INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA FUERZA DE LA COOPERACIÓN | RAYOS GAMMA EN LAS TORMENTAS | AGRICULTURA ECOLÓGICA

OCTUBRE 2012 N.º 433

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CONSERVACIÓN
¿Qué especies deberíamos proteger?

FÍSICA
Rayos gamma en las nubes de tormenta

AGRICULTURA
Edafología de los cultivos ecológicos



La fuerza de la cooperación

Ventajas evolutivas del altruismo

00433
9 770210 136004
6,50 EUROS



KENN BROWN/MONDOLITHIC STUDIOS

ARTÍCULOS



7

44



88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El comportamiento colaborativo ha demostrado ser una fuerza evolutiva tan poderosa como la lucha egoísta por la supervivencia. Se documenta en todos los seres vivos, desde los microorganismos hasta los humanos. La teoría de juegos permite clasificar todos los mecanismos de cooperación observados en la naturaleza en cinco tipos y analizar sus ciclos evolutivos. Fotografía de Stephen Wilkes. Modelos: Compañía de danza Momix.



redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo y Agosto 2012

OPACIDAD ESTELAR

En «El futuro de las estrellas» [Investigación y Ciencia, mayo de 2012], Donald Goldsmith sostiene que la luminosidad de una estrella rica en elementos pesados desciende debido a que estos aumentan la opacidad de las capas exteriores. Después, en la siguiente frase, señala que «una menor luminosidad implica un consumo más lento del combustible nuclear». Entonces, ¿cuál es la causa? ¿El aumento en la opacidad, o un consumo más lento del combustible?

Por otro lado, cabría esperar que la radiación atrapada por las capas exteriores provocase un aumento de la temperatura y que, en consecuencia, se incrementase también el ritmo de la fusión. ¿Qué ocurre?

Dov Elyada
Haifa, Israel

Responde Goldsmith: *En las estrellas, la energía se genera en el núcleo. Esa energía se transmite después hacia la superficie y, desde allí, se radia al espacio. El descenso en la luminosidad se debe a una mayor opacidad, pues ello impide el paso de la radiación. Pero una menor luminosidad implica también un ritmo más bajo en la producción de energía y, por tanto, un consumo más lento del combustible nuclear.*

El aumento en la opacidad conduce a una mayor absorción de la radiación, lo cual provoca efectos complejos en la atmósfera estelar. Entre ellos, un posible aumento de su tamaño y temperatura. Sin embargo, es la temperatura del núcleo, no la de la atmósfera, lo que determina la tasa de producción de energía de una estrella.

MENTES SINGULARES

En «La singularidad de cada cerebro» [Investigación y Ciencia, mayo de 2012], Fred H. Gage y Alysson R. Muotri sostienen que los «genes saltarines» (segmentos de ADN capaces de copiarse a sí mismos en diferentes partes del genoma) podrían explicar por qué cada cerebro constituye un órgano único. Sin embargo, ello no da cuenta del grado de similitud que cabría esperar en el cerebro de dos gemelos idénticos. Su trabajo revela un mecanismo intrigante a la hora de explicar la variación genética entre uno y otro, pero su relevancia debe aún aclararse.

Los autores pasan por alto el hecho de que, casi con total seguridad, dos cerebros —genéticamente idénticos o no— siempre presentarán diferencias notables como consecuencia de las variaciones inherentes al proceso de división de las células madre neuronales, los episodios de migración celular y la formación de circuitos neuronales. Dichas variaciones surgen debido a las interacciones celulares y dependientes de la experiencia que, siendo únicas y a menudo probablemente aleatorias, se producen durante el desarrollo de todo cerebro.

Nicholas Gaiano
Facultad de medicina
Universidad Johns Hopkins

DESAFÍO RESPIRATORIO

La lectura de «Los límites de la apnea», de Michael J. Parkes [Investigación y Ciencia, agosto de 2012], me hizo recordar que en 1958 decidí medir mi capacidad de contener la respiración bajo el agua. Descubrí que, si flotaba boca abajo y relajado, podía flexionar los músculos del diafragma repetidas veces para retrasar la apremiante toma de aire. Gracias a ello logré permanecer así hasta cerca de cuatro minutos.

Jon Otterson
Madison, Wisconsin

Otra manera de contener la respiración consiste en expeler el aire por completo y comprobar cuánto tiempo puede aguantarse hasta una nueva inspiración. Existe ahí un punto límite, pero el diafragma se «mantiene» en un estado de relajación total, no de contracción. ¿Afecta el mismo mecanismo a ambas situaciones?

Bryon Moyer

Mi madre adoptiva cuenta que, una noche, me halló inmóvil, sin reaccionar y con la piel azulada. Por fortuna no pasé a engrosar la estadística de víctimas del síndrome de muerte súbita del lactante (SMSL). ¿Podría un diafragma subdesarrollado ser causa de una apnea involuntaria en los bebés y, por tanto, explicar el SMSL?

Bennett A. Wallace
Louisville, Kentucky

Responde Parkes: *Las preguntas señalan la necesidad de investigar más sobre el diafragma. Con respecto a la pregunta de Moyer, se sabe que con los pulmones vacíos solo es posible aguantar un tiempo muy breve. Sin embargo, ¿se «mantiene» el diafragma en su longitud relajada debido a una contracción isométrica, o en un estado de relajación total? Por otro lado, estas breves retenciones de aliento no confirman ni desmienten la hipotética función del diafragma en el punto de ruptura. Sus quimiorreceptores podrían verse aún estimulados por el rápido aumento de dióxido de carbono o la falta de oxígeno.*

Sobre la pregunta de Wallace, son muchas las hipótesis que intentan explicar el SMSL. No resulta nada sencillo demostrar experimentalmente en bebés que su origen se deba a un desarrollo deficiente del diafragma.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



FÍSICA

Materiales paradójicos

Podríamos llamarlo la psicología inversa de la física de materiales: imagine un cojín que se hincha al sentarnos sobre él o una goma elástica que se encoge cuando intentamos estirarla. Si dos físicos de la Universidad Noroccidental se hallan en lo cierto, puede que pronto veamos aparecer materiales con tan desconcertante comportamiento.

Adilson Motter y Zachary Nicolaou describieron su propuesta en un artículo publicado el pasado mes de mayo en la edición en línea de la revista *Nature Materials*. En él, demostraron que esta respuesta tan extraña, denominada compresibilidad negativa, podría conseguirse —al menos en teoría— al ensamblar de la manera correcta los componentes de un *metamaterial*, uno cuyo comportamiento no queda determinado por su composición química o molecular, sino por su estructura a escalas mayores.

Cada molécula actuaría como el muelle de una caja sorpresa: al sufrir una ligera compresión, pasaría a un estado expandido. Y, al igual que para devolver el muelle al interior de la caja, también estos materiales necesitarían energía para regresar a su estado original. Según los autores, la compresibilidad negativa podría lograrse si se dispusiesen de la manera adecuada un gran número de moléculas de este tipo: «Todo lo que se necesita para fabricar dicho material ya existe», explica Motter, si bien nadie ha desarrollado aún la ingeniería necesaria para su construcción.

¿Para qué serviría? Las aplicaciones más prometedoras se orientan hacia la fabricación de nuevos sensores y actuadores, ya que tales materiales podrían amplificar una fuerza al expandirse o contraerse, así como en cinturones de seguridad para automóviles. Por ahora, sin embargo, solo se trata de una idea curiosa.

—*Davide Castelvecchi*

OCEANOGRAFÍA

Plástico fantástico

La durabilidad del plástico contribuyó a convertirlo en un material popular y milagroso a comienzos del siglo xx. Ahora, sin embargo, su omnipresencia podría estar perturbando los ecosistemas de manera sorprendente. Un nuevo estudio realizado por investigadores del Instituto Scripps de Oceanografía de La Jolla, California, muestra que la concentración de plástico se ha multiplicado por cien a lo largo de los últimos cuarenta años en el giro subtropical del Pacífico Norte, una enorme zona de calma en el centro de una rotación en sentido horario de las corrientes oceánicas entre Asia oriental y la Costa Oeste de los EE.UU., con Hawái como su centro aproximado. Se estima que el tamaño del área supera los 18 millones de kilómetros cuadrados.

El estudio, publicado en línea el 9 de mayo en *Biology Letters*, también documentó por primera vez un aumento en la densidad de huevos del patinador marino *Halobates sericeus*, un insecto acuático que pone sus huevos en objetos flotantes. El equipo recogió y analizó datos en trozos de plástico de menos de cinco milímetros de diámetro en la zona norte del océano Pacífico, incluyendo registros de dos viajes recientes, datos publicados en otras fuentes y datos desarrollados a partir de muestras archivadas de la colección Scripps, recogidas a principios de los setenta. La autora, Miriam Goldstein, estudiante de doctorado en biología oceanográfica en Scripps, señala que un estudio de 2011 que examinó el giro subtropical del Atlántico Norte no encontró un aumento del plástico desde 1986.

Una mayor concentración de restos flotantes de plástico ofrece más oportunidades para que el patinador marino ponga sus huevos. Este hemíptero, pariente

PSICOLOGÍA

Eyecciones mentales

A menudo, rebuscamos entre nuestros recuerdos para obtener información («¿Dónde dejé las llaves del coche?», «¿Seguro que he apagado el horno?»). En otras ocasiones, rememoramos activamente el pasado («¿Te acuerdas de la noche loca de la semana pasada?»). Sin embargo, no toda remembranza es voluntaria: los recuerdos acuden a veces a nuestra mente sin que podamos controlarlo. Uno de los ejemplos más famosos procede de una escena de *En busca del tiempo perdido*, de Marcel Proust. Mientras el narrador bebe té y degusta una magdalena, el sabor le evoca el recuerdo de haber comido lo mismo cuando era joven, en casa de su tía.

Los expertos han comenzado a investigar una forma de memoria relacionada, un fenómeno al que han dado en llamar «eyecciones mentales» (*mind pops*): palabras, imágenes o melodías que se nos hacen conscientes de forma repentina e inesperada. A diferencia del ejemplo de Proust, las eyecciones mentales (término acuñado por George Mandler, catedrático emérito de la Universidad de California en San Diego) parecen del todo irrelevantes para el momento y los pensamientos que interrumpen. Se trata con mayor frecuencia de palabras o frases que de imágenes o sonidos, y suelen aparecer cuando nos hallamos ocupados en una tarea habitual que no exige demasiada concentración. Por ejemplo, estamos fregando los platos cuando, sin causa aparente, se nos viene a la cabeza la palabra «orangután». Identificar el desencadenante a partir del entorno o de los pensamientos anteriores resulta extremadamente difícil, por lo que tales recuerdos aparentan haber surgido de la nada.

Sin embargo, estudios recientes apuntan a que no se trata de un fenómeno aleatorio. Aunque no resulte aparente, las eyecciones mentales guardarían una relación con nuestra experiencia y nuestro conocimiento del mundo. Si bien las investigaciones son aún preliminares, sugieren que se trata de un fenómeno

cercano de los zapateros de agua dulce, pasa toda su vida en mar abierto y desempeña su papel en la red trófica consumiendo zooplancton y alevines, y siendo devorado a su vez por cangrejos, peces y aves marinas.

Los objetos flotantes solían ser muy poco frecuentes en el Pacífico Norte. Un patinador se habría considerado afortunado si hubiera encontrado una pluma o un trozo de madera flotante. Ahora, en cambio, los fragmentos de plástico son más comunes y ofrecen una superficie en la que estos hemípteros pueden poner sus huevos de color amarillo brillante y del tamaño de granos de arroz.

Aunque los investigadores encontraron un aumento del número de huevos, no observaron un aumento paralelo del número de insectos. Ello puede deberse a la ausencia de muestras suficientes de principios de los setenta con las que comparar la cantidad de insectos, o a que los cangrejos o pequeños peces que se alimentan en la superficie marina se estén comiendo los huevos.

Los investigadores están preocupados por la posibilidad de que esta proliferación de plástico esté confiriendo una ventaja a los patinadores y a algunos microorganismos, animales y plantas que medran en el plástico en comparación con animales marinos que no están asociados con superficies de ese tipo (peces, calamares, pequeños crustáceos o medusas). «Si bien estos organismos [los que crecen directamente en el plástico] son fauna indígena de la zona, en cierto modo pueden considerarse como malas hierbas», explica Goldstein, porque crecen, se reproducen y mueren rápidamente. En cambio, otros organismos de esas aguas mantienen una mayor biodiversidad. Más de la mitad del océano forma parte de los giros subtropicales y un cambio en las condiciones de dichos giros por el aumento de grandes cantidades de residuos de plástico podría acarrear consecuencias impredecibles. «Aunque nuestro estudio se refiere solo a un diminuto insecto de una zona particular del océano, muestra que los pequeños trozos de plástico podrían alterar la ecología del mar abierto», afirma Goldstein.

—Carrie Madren



Los patinadores marinos se reproducen como una «mala hierba».

THOMAS FUCHS (*ilustraciones*); ANTHONY SMITH (*patinador*)

genuino y muy común. Ciertas personas se percatan de sus eyecciones mentales más a menudo que otras, lo cual podría acelerar la resolución de problemas y aumentar la creatividad. En cambio, para otros individuos —como los que padecen esquizofrenia—, las eyecciones mentales dejarían de ser un fenómeno benigno para convertirse en inquietantes alucinaciones.

Lia Kvavilashvili, psicóloga de la Universidad de Hertfordshire, y Mandler proponen una explicación del fenómeno basada en una especie de activación asociativa a largo plazo. Este fenómeno describe una de las formas en las que funciona la memoria: cada vez que recibimos nuevos datos, estos modifican la manera en que nuestra mente responderá ante información relacionada. «La mayor parte de la información con la que nos encontramos a diario activa ciertas representaciones mentales», explica Kvavilashvili. «Si pasamos por delante de un puesto de pescado rebozado, en nuestra mente se activará no solo el concepto de pescado, sino también otros que, relacionados con este, podrán permanecer activos durante un tiempo, horas o incluso días. Después, otros elementos del entorno quizá desencadenen la aparición de uno de esos conceptos activos, el cual dará la impresión de haber salido de la nada.» Este fenómeno puede redundar en beneficio de la creatividad: «Si se encuentran activos una gran cantidad de conceptos, las conexiones podrán establecerse de manera más eficiente que si la activación se hubiese desvanecido de inmediato».

Kvavilashvili y sus colaboradores publicaron un estudio en el que examinaban un posible lado oscuro de las eyecciones mentales. En él, se preguntaban por las semejanzas entre tales recuerdos involuntarios y las alucinaciones y pensamientos perturbadores que asaltan a los individuos que padecen depresión, síndrome de estrés postraumático o trastorno obsesivo-compulsivo. Los resultados, que aparecieron en el número de abril de la revista *Psychiatry Research*, sugieren que las eyecciones mentales resultan más frecuentes entre aquellos que padecen una enfermedad mental que entre individuos sanos. Sin embargo, aún es demasiado pronto para vincular recuerdos repentinos y alucinaciones.

Kvavilashvili ha investigado otras cuestiones, como la relación entre las eyecciones mentales de carácter musical con las canciones que no podemos sacarnos de la cabeza. La psicóloga conviene en que el estudio del fenómeno se encuentra aún en su infancia: «Sentí curiosidad por él porque parecía totalmente aleatorio, pero las eyecciones mentales se corresponden con genuinos fragmentos de conocimiento acerca del mundo. Nos muestran que, a menudo, el subconsciente comprende el significado de una experiencia, aunque nosotros conscientemente no lo hagamos», concluye.

—Ferris Jabr

INGENIERÍA

Virus bacteriófagos para recargar el teléfono

En su búsqueda de fuentes energéticas respetuosas con el entorno, los científicos han venido empleando seres vivos cada vez más diminutos: maíz, algas, bacterias... Ahora, un grupo de ingenieros de la Universidad de California en Berkeley ha conseguido dar un paso más al descubrir cómo generar electricidad a partir del fago M13, un virus que infecta bacterias. Aunque por el momento este dispositivo de «energía vírica» cuenta solo con una potencia limitada, podría allanar el camino hacia la obtención de teléfonos móviles con la capacidad de recargarse mientras caminamos.

El ingenio se basa en la piezoelectricidad, una propiedad que permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica. La mayoría de los micrófonos de los teléfonos móviles son piezoeléctricos: convierten la energía de las ondas sonoras en señales eléctricas, las cuales se transmiten y vuelven a transformarse en ondas sonoras en el teléfono receptor. El problema de los dispositivos piezoeléctricos, señala Seung-Wuk Lee, experto en bioingeniería de Berkeley, reside en que se fabrican con metales pesados, como el plomo o el cadmio. Pero numerosas biomoléculas, como las proteínas o los ácidos nucleicos, también son piezoeléctricas. Generan electricidad al ser comprimidas, con la ventaja de que no muestran la toxicidad de los dispositivos tradicionales.

Lee y sus colaboradores han descubierto que el bacteriófago M13, con forma de bastoncillo, cumple con todos los requisitos. Dado que solo infecta bacterias, es seguro para los humanos. Además, resulta barato y fácil de crear, pues pueden conseguirse billones de ellos a partir de un solo frasco de bacterias. La geometría del virus también reviste su importancia, ya que facilita que este se disponga de forma espontánea en finas capas. A fin de mejorar la capacidad del M13 para generar electricidad, el equipo de Lee modificó el contenido de aminoácidos de la capa exterior de proteínas del virus mediante la adición de cuatro moléculas de glutamato, con carga negativa. Para amplificar el efecto piezoeléctrico, se superpusieron varias capas de virus.

Al conectar la película de virus, de un centímetro cuadrado, a una pareja de electrodos de oro y presionar con firmeza uno de estos, la electricidad generada bastó para que el número 1 apareciese en una pantalla de cristal líquido. Aunque el voltaje no pasó de los 400 milivoltios (en torno a un cuarto del de una pila AAA), el estudio ha demostrado la viabilidad de los biomateriales piezoeléctricos.

«El experimento hará de este campo de investigación algo mucho más emocionante», asegura Zhong Lin Wang, ingeniero del Instituto Tecnológico de Georgia que no participó en el estudio. «Las propiedades de estos biomateriales permitirán aplicaciones excepcionales en el futuro», como un marcapasos alimentado por el latido del propio corazón.

—Carrie Arnold

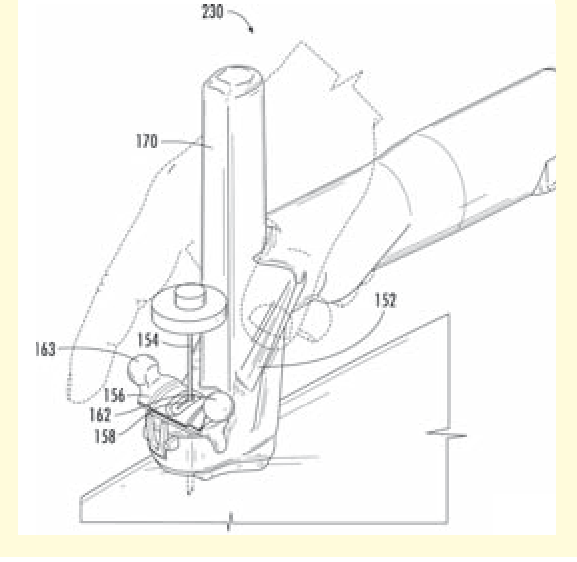
PATENTES

Sonda guiada por ultrasonidos: Cuando un médico pone una inyección a un paciente, no puede ver absolutamente nada. Bajo la piel hay un mundo oscuro y misterioso. Este problema llamó la atención de Stephen Ridley, presidente y director médico de Soma Access Systems, una compañía de ingeniería médica de Carolina del Sur.

Los ultrasonidos permiten tomar imágenes de los tejidos, pero no de la aguja. Su superficie metálica y curvada dispersa las ondas, por lo que, a grandes rasgos, resulta invisible. A raíz de su experiencia en ingeniería y medicina, Ridley ha diseñado una posible solución: combinar ultrasonidos y magnetismo. Mientras que los primeros muestran los tejidos, un pequeño imán en la punta de la aguja es detectado por otros imanes emplazados en la sonda. El campo magnético generado no interfiere con los ultrasonidos, pero permite que el practicante vea tanto el tejido que está perforando como la aguja con la que lo traspasa. Al ayudarle a colocar la aguja de la manera adecuada, el dispositivo elimina buena parte de las conjeturas hasta ahora inherentes a la práctica.

Ridley concibió la idea con un procedimiento concreto en mente: perforar una vena central para realizar una transfusión de grandes cantidades de sangre o plasma después de un traumatismo. Más tarde, al mostrar a otros especialistas el dispositivo (registrado con la licencia 8.152.724 en la Oficina de Patentes de EE.UU.), se percató de que las aplicaciones iban más allá: desde una amniocentesis hasta la inyección de medicamentos en las articulaciones.

—Rose Eveleth



THOMAS FUCHS (*ilustración*); OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. (*sonda*)

FÍSICA

Precipitaciones primigenias

Hace unos 2700 millones de años, en lo que hoy es la granja Omdraaisvlei, cerca de Prieska, las gotas de lluvia de una breve tormenta golpearon la capa de ceniza de una erupción volcánica reciente. Las gotas, que formaron pequeños cráteres, fueron enterradas por más ceniza; a lo largo de los eones, esta se endureció hasta petrificarse. En fecha más reciente, otras tormentas erosionaron la roca, dejando al descubierto un registro fósil de los efectos de la precipitación en la era Arcaica. Un grupo de investigadores está estudiando dicha lluvia fosilizada, para obtener información sobre la atmósfera de la Tierra primitiva.

Mediante el uso de láseres para escanear los cráteres y la comparación de las huellas con las creadas hoy en día en circunstancias similares, Sanjoy Som y sus colaboradores, del Centro de Investigación Ames de la NASA, han obtenido una medida de la presión ejercida por la atmósfera primitiva. Según explicaron en el número en línea del 28 de marzo de la revista *Nature,* puede que esta fuera mucho menos densa que la actual.

La clave para llegar a tal conclusión reside en el tamaño de las gotas de lluvia. Ya en 1851, Charles Lyell, pionero de la geología, sugirió que las medidas de las huellas fosilizadas de las precipitaciones podrían revelar detalles sobre la atmósfera primitiva. Puesto que esta provoca rozamiento en las gotas (reduce su velocidad de descenso según el tamaño), si se determinara el volumen de una gota de lluvia de los tiempos antiguos, podría estimarse la densidad de esa atmósfera. Para averiguar el tamaño de aquellas gotas de agua primitivas, Som y sus colaboradores tuvieron que ser creativos. Recogieron ceniza de la erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull en 2010, así como otras muestras procedentes de Hawái, y dejaron caer sobre ellas gotas de agua de varios tamaños desde una altura de 27 metros. Después, «petrificaron» estos cráteres modernos mediante laca para el pelo y uretano líquido de baja viscosidad. La comparación de los cráteres antiguos y los nuevos llevó a la conclusión de que las gotas primitivas presentaban un tamaño de entre 3,8 y 5,3 milímetros.

Las relaciones entre el tamaño de las gotas de lluvia, su velocidad y la densidad atmosférica sugieren que el ambiente primitivo de la Tierra probablemente ejerció una presión entre la actual y la mitad de esta.

Estos resultados arrojan luz sobre otro misterio de la joven Tierra: la paradoja del «Sol joven y débil». Hace miles de millones de años, el Sol emitía menos radiación y calentaba menos el planeta, pero el registro fósil sugiere un clima templado. Si la atmósfera no era más densa que ahora, ¿cómo podía retener tanto calor? La explicación más sencilla sugiere que la atmósfera terrestre era rica en gases de efecto invernadero, capaces de atrapar una gran cantidad de calor por molécula. Su origen más probable serían las erupciones volcánicas y la vida microbiana. Según Som, es probable que el cielo presentara un aspecto neblinoso debido a estos gases.

En la misma dirección, una investigación publicada en línea el 18 de marzo en la revista *Nature Geoscience* sugiere que la atmósfera primitiva atravesaba ciclos periódicos de «neblina de hidrocarburos», que incluían gases de efecto invernadero como el metano. Este tipo de bruma, que podría estar reproduciéndose hoy en día, ayudó a atrapar el calor del Sol, haciendo la vida más cómoda para los microorganismos —y quizás ofrezca señales de la presencia de vida en otros planetas.

—*David Biello*



ISTOCKPHOTO (*gota de agua*); CARLOS CUENCA SOLANA / FECYT - CSIC (*pompas de jabón*)

AGENDA

CONFERENCIAS

4 de octubre
Energía sin futuro, futuro sin energía
Antonio Turiel, Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)
Sala Marsà, Tárrega
www.ciudadciencia.es/agenda

25 de octubre - Ciclo
Turing 100 años
Ricard V. Solé, Universidad Pompeu Fabra e Instituto Santa Fe
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
blocs.iec.cat/arban

30 de octubre
IceCube: un observatorio de neutrinos en el Polo Sur
Francis Halzen, Universidad de Wisconsin Madison
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

EXPOSICIONES

Casi humanos: origen y evolución de los hominoideos
Museo del Instituto Catalán de Paleontología Miquel Crusafont
Sabadell
www.icp.cat

Fotciencia9
Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales
Universidad de León
León
www.fotciencia.es



OTROS

9, 10 y 11 de octubre - Debate
El futuro de la genómica vegetal
Cosmocaixa
Barcelona
www.bdebate.org

18 y 19 de octubre
Simposio internacional sobre paleoneurología humana
Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana
Burgos
www.cenieh.es/es/evento/simposio-internacional-human-paleo-neurology

QUÍMICA

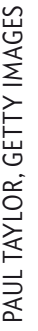
Por qué algunos tomates saben mejor

El típico tomate de supermercado es de color rojo intenso, se muestra firme al tacto y carece de marcas... y de sabor. Al menos desde la década de los setenta, los consumidores se quejan de los hermosos pero insípidos frutos que los productores no seleccionan por el sabor, sino por su alto rendimiento y resistencia durante el envío. Durante los últimos años, los que practican la agricultura ecológica y los gastrónomos han defendido el sabor superior de los tomates tradicionales, las variedades más antiguas que producen una gran diversidad de formas, tamaños y colores. En un estudio publicado en junio en *Current Biology*, un grupo de investigadores examinó la composición química de tomates habituales así como de más de cien variedades tradicionales, además de servírselos a 170 voluntarios en una prueba de sabor. Los resultados confirman lo que los científicos han descubierto en los últimos años: el sabor de un tomate no depende solo del equilibrio de azúcares y ácidos que hay en él, sino también de compuestos aromáticos más sutiles, muchos de los cuales están ausentes en los modernos tomates de supermercado.

Harry Klee, de la Universidad de Florida, lleva una década estudiando el sabor de estas bayas. Algunas de las carencias de los tomates de supermercado, señala, se deben a que los agricultores han seleccionado sus plantas de forma que produzcan la mayor cantidad posible de frutos. Cuantos más tomates produce una planta, menos azúcar puede invertir en cada uno de ellos. Sabiendo que el sabor del tomate depende de otras cosas aparte del azúcar, Klee y sus colaboradores iniciaron un proyecto hace tres años para analizar la mezcolanza química que determina el sabor de un tomate. Klee piensa que sus resultados sugieren una nueva forma de mejorar el sabor de estos frutos sin sacrificar las ventajas económicas de las plantas de alto rendimiento.

El equipo de Klee cultivó 152 variedades tradicionales de tomate en terrenos e invernaderos de la Universidad de Florida y compró tomates estándar en un supermercado cercano. Los científicos cortaron las hortalizas en rodajas y se las ofrecieron a voluntarios que mordieron, saborearon y tragaron cuidadosamente cada bocado, asignando una puntuación a la textura y al carácter dulce, ácido y amargo del mismo, así como al sabor en general y a cuánto habían disfrutado comiendo cada muestra en particular. Como era de esperar, los probandos prefirieron el sabor de los tomates con mucho azúcar al de otros con menos, pero el contenido de azúcar no explicaba totalmente sus preferencias. Una serie de compuestos volátiles, que fluyen hasta nuestra nariz cuando cortamos o mordemos un tomate, también contribuían al sabor.

Según el análisis de Klee, las sustancias volátiles más abundantes en el tomate, denominadas C6, apenas tenían influencia en la opinión de los voluntarios acerca del sabor de la hortaliza. En cambio, el geranial, un compuesto volátil menos frecuente, marcó una gran diferencia. Klee llegó a la conclusión de que el geranial mejoraba en general el sabor del tomate, aumentando quizá la dulzura del mismo. En comparación con las variedades tradicionales, los tomates estándar contienen menos geranial y otros compuestos volátiles. «Se parecen a la cerveza *light*», afirma. Mediante la selección o modificación genética de los tomates para que contengan grandes cantidades de los compuestos volátiles preferidos en las pruebas de sabor, podrían producirse variedades especialmente dulces y sabrosas, sin aumentar el contenido en azúcar. *—Ferris Jabr*



HISTORIA DE LA TÉCNICA

El origen de la cinta adhesiva

En 1930, un nuevo y mejorado papel fino llamado celofán, un polímero transparente de celulosa, cautivaba a las compañías empaquetadoras de alimentos. Los envoltorios de celofán mantenían frescos los alimentos y, sin embargo, permitían que el comprador viera el contenido. Pero la hermeticidad de los empaques de celofán fue un problema hasta que la 3M Company inventó y patentó la cinta Scotch, un nombre que los estadounidenses emplean para todas las cintas adhesivas de celofán. En Europa se introdujo siete años después el Sellotape, un producto análogo, con el mismo uso genérico del nombre. En España se comercializa hace años la cinta Cel·lo, y *celo* tiene ya entrada en el diccionario.

Los ingenieros califican de adhesivo sensible a la presión a la cola que se emplea en la cinta Scotch. No se pega formando enlaces químicos con el material sobre el que se coloca, dice Alphonsus Pocius, del Laboratorio de Investigación de Materiales de la Compañía 3M en Saint Paul (Minnesota). En vez de ello, la presión aplicada fuerza a la cola a penetrar en las más minúsculas irregularidades de la superficie del material. Una vez allí, se resiste a retroceder, con lo que la cinta se mantiene adherida a su posición inicial. La cola debe ser medio líquida y medio sólida; lo bastante fluida para desparramarse bajo presión y lo bastante viscosa para resistirse al flujo.

Pero la elaboración del tipo adecuado de cola no es la única parte del invento. Una cinta adhesiva típica contiene no solo dos materiales (la cola y el sustrato, que puede ser celofán o algún otro plástico), sino cuatro. Una capa de imprimación facilita la adherencia de la cola al plástico, mientras que en la otra cara un «agente liberador» garantiza que la cola no se pegue a la otra cara de la cinta; si no, sería imposible desenrollarla.



La cinta adhesiva ha captado también la atención de los físicos. Unos investigadores observaron que al desenrollar una cinta en una cámara de vacío se liberaban rayos X, los cuales emplearon para formar imágenes de los huesos de sus dedos como demostración. Este hallazgo podría dar lugar a máquinas radiográficas baratas y portátiles (e incluso a máquinas potentes). El desenrollado crea cargas electrostáticas, y los electrones que saltan desde la cinta al rollo producen esos rayos X. En presencia de aire, los electrones son mucho más lentos y no producen rayos X. Pruebe usted a desenrollar una cinta adhesiva en una habitación completamente a oscuras y percibirá un tenue fulgor. —*Davide Castelvecchi*

¿QUÉ ES ESTO?



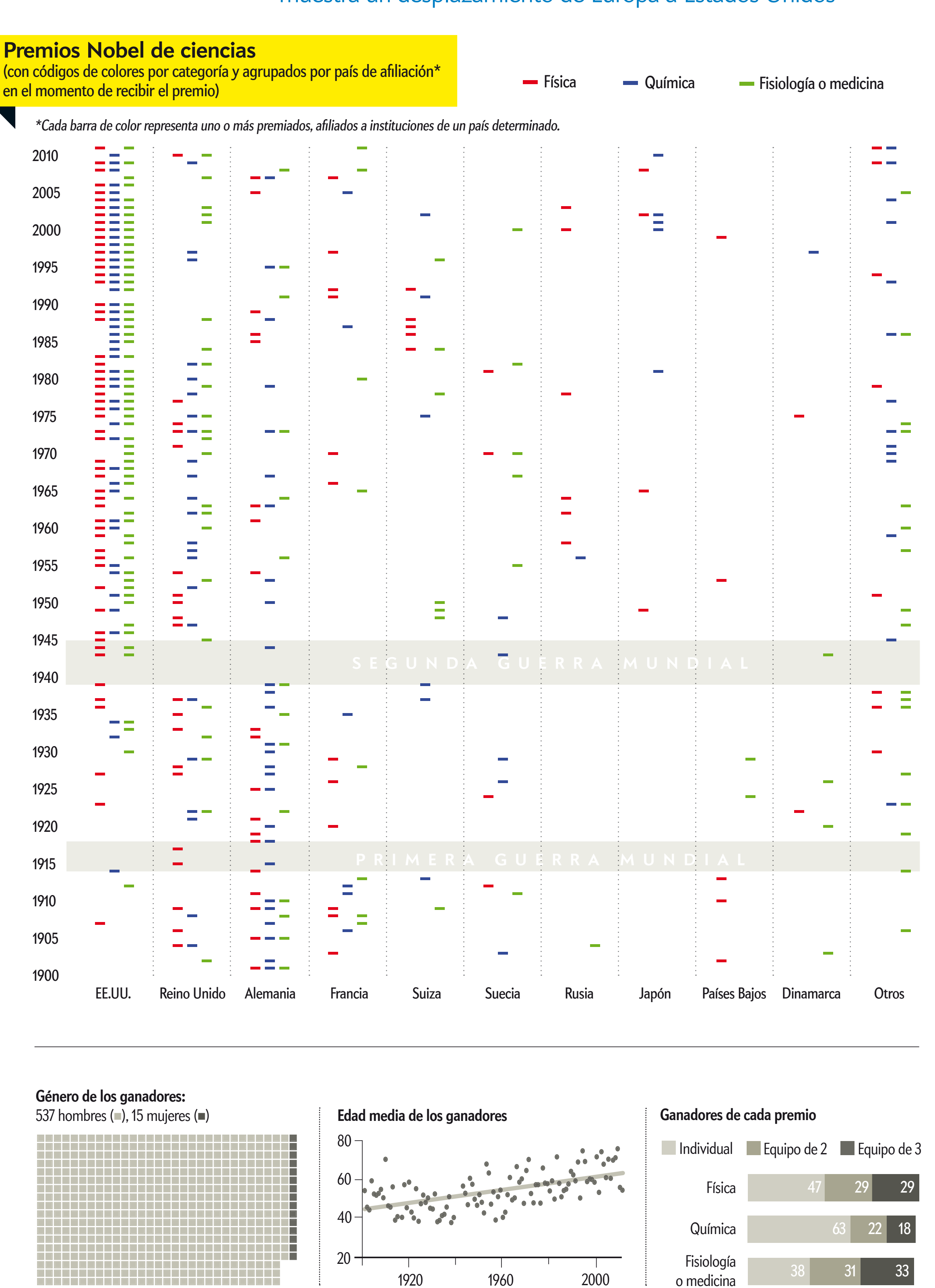
Una sensación en el estómago: Una imagen microscópica de un medicamento que no requiere prescripción médica es uno de los ganadores de los Premios de Imágenes Wellcome de este año. Aquí podemos ver una puntiaguda muestra de 150 micras de loperamida, una sustancia usada para tratar la diarrea. Esta funciona ralentizando el movimiento de las heces a través del conducto gastrointestinal, dando así más tiempo para que el agua contenida en ellas sea absorbida. Annie Cavanagh, antigua encargada de servicios multimedia de la Escuela Universitaria de Farmacia de Londres, trabajó con su compañero David McCarthy para crear esta micrografía con colores artificiales del grupo cristalino. Cavanagh espera que las imágenes que han obtenido de otros medicamentos comunes hagan que aumente el interés por los estudios farmacéuticos. —*Ann Chin*

JAUNTY JUNTO, GETTY IMAGES (*cinta adhesiva*); CORTESÍA DE ANNIE CAVANAGH, WELLCOME IMAGES (*fármaco*)

PREMIOS NOBEL

Migraciones de medallas

La distribución global de los premios Nobel muestra un desplazamiento de Europa a Estados Unidos



27

Premios Nobel de ciencias ganados por investigadores de la Universidad Harvard o la Escuela de Medicina de Harvard. Más que ninguna otra institución.

4

Miembros de la familia Curie que ganaron premios Nobel: Marie y Pierre Curie el de física en 1903, Marie Curie el de química en 1911 e Irène Joliot-Curie (hija de Marie y Pierre Curie) y su marido Frédéric Joliot también el de química en 1935.

25

Edad del ganador más joven, Lawrence Bragg, que compartió el Nobel de física de 1915 con su padre, William Bragg. El siguiente galardonado más joven tenía 31 años.

103

Edad de la laureada más anciana, Rita Levi-Montalcini, que compartió el Nobel de fisiología o medicina en 1986.

TIMEPLOTS (gráfico); FUENTE: NOBELPRIZE.ORG

BIOINGENIERÍA

Control celular mediante luz

Ciertas moléculas fotosensibles permiten manipular de forma remota y no invasiva procesos biológicos y farmacológicos

El uso de la luz para estudiar sistemas biológicos empezó con la observación visual de organismos vivos. Desde los primeros microscopios, los instrumentos ópticos han avanzado hasta los dispositivos de fluorescencia más modernos. En la actualidad existe un gran interés en el uso de la luz como herramienta no solo para observar, sino también para manipular procesos biológicos. Este nuevo enfoque se enmarca en la tendencia hacia una investigación biomédica cuantitativa y predictiva, que requiere ir más allá de la mera descripción de los procesos fisiológicos y fisiopatológicos, hasta su alteración voluntaria, sea con la intención de verificar hipótesis sobre su funcionamiento o con fines terapéuticos.

Para ambos propósitos (observación y manipulación), la luz ofrece múltiples ventajas técnicas: atraviesa con facilidad numerosos tejidos sin alterarlos (no es invasiva), proporciona una elevada resolución espacial (subcelular) y temporal (de milésimas de segundo o menos), y permite introducir elementos que interaccionen con la luz de forma específica (estructuras fotosensibles) y sin perjuicio para el uso de otras técnicas.

Control remoto

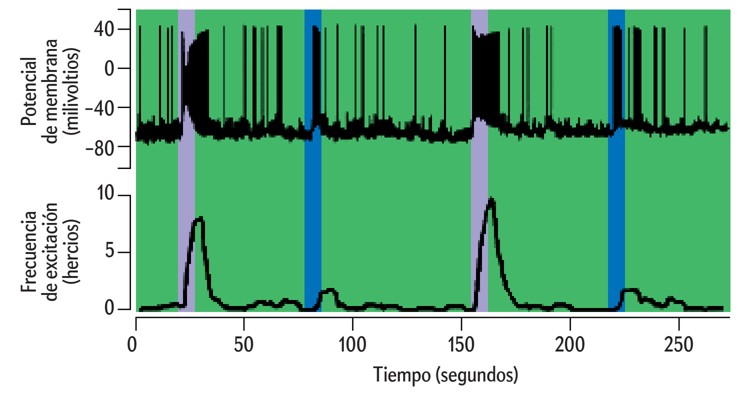
En el caso de la manipulación, la luz permite controlar de forma remota la actividad de moléculas fotosensibles, grupos de proteínas, células individuales y circuitos celulares que gobiernan comportamientos específicos de un organismo. Mediante estas técnicas, el experimentador puede alterar la concentración de señalizadores intracelulares esenciales como el calcio, el inositol trifosfato, el diacilglicerol o el adenosín monofosfato cíclico; puede provocar o impedir el ensamblaje de proteínas necesarias para determinadas funciones celulares; o regular a voluntad el potencial de membrana de las células mediante el flujo de protones, sodio, potasio y cloruro.

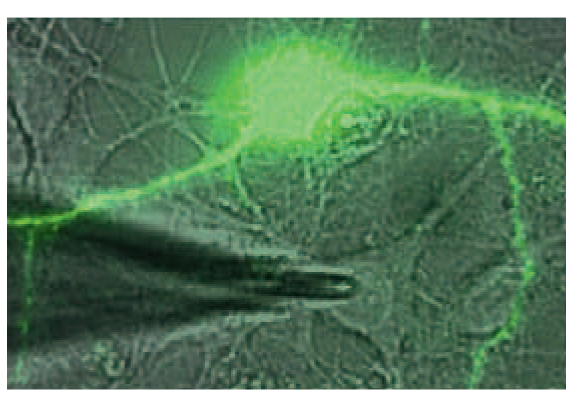
Dado que el potencial de membrana determina la actividad eléctrica de las neuronas, la luz permite también estimular o inhibir la generación de impulsos nerviosos. Cuando el control remoto de la actividad neuronal se restringe a un determinado circuito neuronal, la tarea de la que este se ocupa queda bajo el control de la luz. En organismos modelo como el nematodo *Caenorhabditis elegans*, cuyas 305 neuronas desempeñan una función bien documentada, se ha conseguido controlar, mediante luz y con gran precisión, la locomoción y la estimulación sensorial. Asimismo, a partir de la combinación de este control óptico remoto y la medida óptica de la actividad neuronal, se han realizado experimentos fisiológicos en animales vivos únicamente con luz; ahora se están ensayando en organismos más complejos (moscas, peces, ratones, ratas y monos).

Fotosensibilización

Existen varias estrategias para dotar de sensibilidad lumínica a las proteínas implicadas en un proceso biológico. Todas se basan en la presencia de moléculas que al absorber luz pueden cambiar reversiblemente de forma (como los derivados sintéticos del azobenceno o el retinal, naturalmente contenido en las rodopsinas, proteínas fotosensibles de los órganos visuales), o bien pueden romper irreversiblemente enlaces químicos (como los derivados del nitrobencilo o del nitrofenilo, compuestos sintéticos que al descomponerse con luz permiten liberar fármacos o iones). En octubre de 2008, Junto con Ehud Y. Isacoff, de la Universidad de California en Berkeley y el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, el autor publicó en *Science* un artículo de revisión que ahondaba en el diseño de proteínas fotosensibles.

Según cuál sea la interacción entre la molécula fotosensible y su proteína diana, distinguimos entre proteínas fotosensibles naturales, proteínas fotosensibilizadas químicamente y bioligandos fotosensibles. En las primeras (naturales), la estructura





Mediante fotoestimulación es posible controlar la neurotransmisión entre una neurona fotosensibilizada (*derecha*, *verde*) y una neurona postsináptica adyacente (en contacto con un electrodo). Como puede observarse en el registro del potencial de membrana (*gráfico superior*) y en la frecuencia de potenciales de acción postsinápticos (*gráfico inferior*), la longitud de onda de la fotoestimulación permite ajustar la frecuencia de los impulsos neuronales: mayor con luz violeta, intermedia con luz azul y menor con luz verde.

MERCÈ IZQUIERDO-SERRA

fotosensible la produce el propio organismo y se halla asociada a la proteína. Los ejemplos más comunes corresponden a la canalrrodopsina-2 y la halorrodopsina, que permiten, respectivamente, activar e inhibir con luz la respuesta eléctrica de neuronas mediante técnicas denominadas optogenéticas [*véase* «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; Investigación y Ciencia, enero de 2011]. El éxito de estas rodopsinas ha provocado en los últimos años una búsqueda de aplicaciones similares basadas en las numerosas proteínas fotosensibles vegetales. Aunque el potencial de esta aproximación es enorme, hay que considerar que la sobreexpresión de proteínas puede entrañar una alteración de la fisiología del organismo, además de requerir métodos invasivos (como la utilización de vectores virales) que las hacen cuestionables terapéuticamente.

En las proteínas fotosensibilizadas químicamente, la molécula fotosensible es sintética y se une permanentemente a la proteína mediante una reacción química. Esta estrategia, aplicada con éxito a receptores de acetilcolina, de glutamato y a canales de potasio, puede considerarse una forma de nanoingeniería de proteínas, ya que los compuestos utilizados constituyen «prótesis moleculares» de dimensiones nanométricas. Estas proteínas fotosensibilizadas también permiten controlar con luz la actividad neuronal y el comportamiento animal. Aunque inicialmente se han empleado proteínas modificadas genéticamente para facilitar su reactividad, la aplicación de compuestos fotosensibles sintéticos a proteínas naturales reviste gran interés, ya que permitiría controlar con luz rutas de señalización celular y hasta organismos enteros sin ninguna manipulación genética previa.

Los bioligandos fotosensibles son pequeñas moléculas sintéticas que se difunden libremente y actúan a modo de ligandos y moduladores de proteínas, uniéndose reversiblemente a ellas. Un importante ejemplo corresponde a los ligandos «enjaulados» (*caged ligands*), que liberan sustancias activas al fotodescomponerse y que permitieron por primera vez manipular mediante luz el comportamiento de animales [*véase* «Observación y control del cerebro», por Gero Miesenböck; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008]. Otros bioligandos fotosensibles experimentan cambios de forma reversible con la luz, de modo que alteran el efecto que ejercen sobre sus proteínas diana. Estos fármacos «fotorregulables» encierran un gran potencial terapéutico y constituyen los pioneros del naciente campo de la optofarmacología.

En nuestro laboratorio estamos desarrollando bioligandos fotosensibles y técnicas de fotosensibilización de proteínas que permiten controlar con luz los dos procesos fundamentales de la neurotransmisión: la endocitosis (formación de vesículas hacia el interior de la neurona) y la exocitosis (liberación a la hendidura sináptica del contenido de las vesículas). La endocitosis se controla mediante inhibidores fotosensibles del ensamblaje y la escisión de vesículas endocíticas. La exocitosis, regulada por el calcio, se modula a través de canales iónicos permeables a calcio fotosensibilizados. Estas herramientas nos permiten manipular la neurotransmisión de forma remota y con gran resolución espacial y temporal, lo que facilita el estudio de sus mecanismos moleculares y alteraciones patológicas.

—Pau Gorostiza
Profesor de investigación ICREA
Instituto de Bioingeniería de Cataluña
Barcelona

ASTROFÍSICA

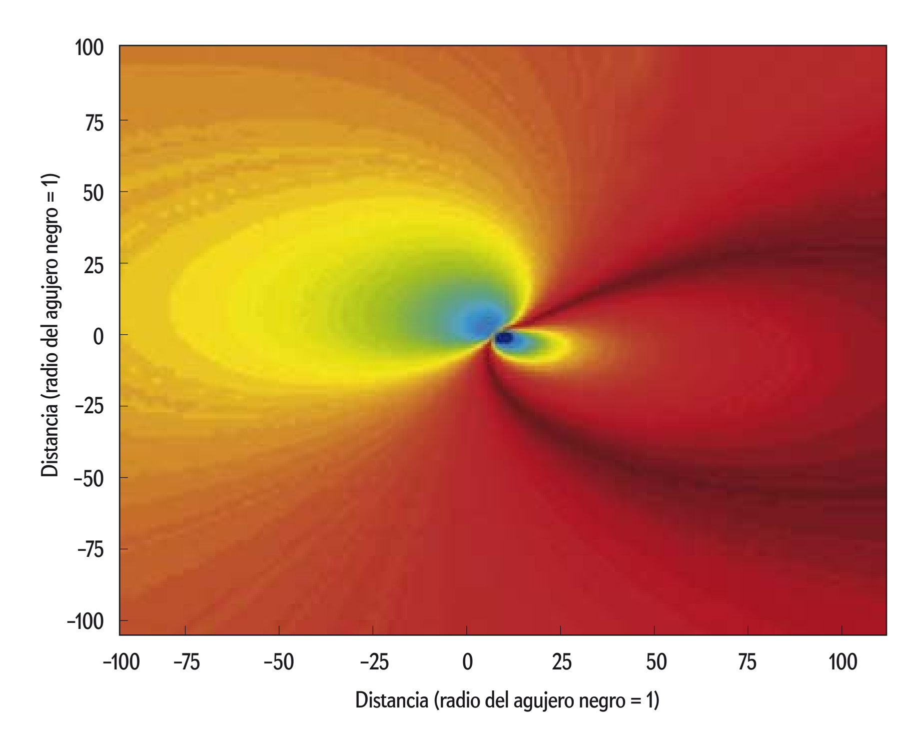
Un nuevo giro en la detección de agujeros negros

Los agujeros negros deforman las propiedades del espacio circundante. Los efectos que ese fenómeno induce sobre los rayos de luz deberían poder detectarse desde la Tierra

Cuando en 1610 Galileo apuntó al cielo con su telescopio, comenzó una revolución singular en la historia de la ciencia. Con el nuevo instrumento, el astrónomo italiano contempló la Luna, los satélites de Júpiter, las manchas del Sol y toda una multitud de fenómenos celestes que nadie había observado con anterioridad. Las consecuencias de aquellos descubrimientos no se ciñeron al ámbito de la física y la astronomía, sino que cambiaron por completo nuestra forma de entender el universo. Si nos detenemos un momento a reflexionar sobre lo que hizo posible aquel gigantesco avance del conocimiento, convendremos en que fue una nueva técnica observacional.

Por supuesto, Galileo se sirvió solo del espectro visible. Hoy, en cambio, podemos observar el universo en un amplísimo intervalo de longitudes de onda que cubre desde las ondas de radio hasta los rayos X y gamma. No solo eso: podemos también medir y extraer información a partir de otras propiedades de la luz. Empleamos datos temporales cuando los objetos astronómicos emiten pulsos electromagnéticos, estudiamos la polarización de la luz para analizar el campo magnético del Sol y otras fuentes, y aprovechamos la información espacial para localizar los astros o evaluar su tamaño.

Junto con otros colaboradores, en un artículo publicado el año pasado en la revista *Nature Physics* propusimos emplear otro elemento más de esta serie para estudiar uno de los objetos más esquivos de la astronomía moderna: los agujeros negros. La información que consideramos que será útil para las próximas generaciones de astrónomos es el momento angular de los campos electromagnéticos. En 1936, Richard Beth demostró con un cuidado montaje experimental que la luz polarizada circularmente hacía rotar un elemento birrefringente (uno cuyo índice de refracción depende de la orientación del material), lo que implicaba la transferencia de momento angular entre la luz y la materia. Pero los campos electromagnéticos pueden transportar momento angular mediante otro mecanismo: el momento angular orbital. Para entender este fenómeno, podemos imaginar los rayos de un haz girando alrededor de su eje de propagación y formando una espiral, como si el frente de ondas trazase una estructura similar a una escalera de caracol. En el eje de propagación se forma un vórtice óptico, en cuyo núcleo no hay luz. Las técnicas de generación y detección de este tipo de haces luminosos son hoy habituales en los laboratorios de óptica y se emplean en multitud de aplicaciones (microscopía, litografía u óptica de láseres).



Simulación por ordenador de lo que se vería desde la Tierra al apuntar a un agujero negro (*centro*) cuyo eje de rotación se encontrase inclinado 45 grados con respecto al observador. La gradación de colores indica los cambios de fase de la luz, los cuales se producen por los efectos que la rotación del agujero negro imprime en el espaciotiempo circundante. La medición de tales variaciones permitiría calcular la tasa de rotación (momento angular por unidad de masa) del agujero negro. Hasta ahora, este parámetro solo podía deducirse por medios muy indirectos.

DE: «TWISTING OF LIGHT AROUND ROTATING BLACK HOLES», F. TAMBURINI, B. THIDÉ, G. MOLINA-TERRIZA Y G. ANZOLIN EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 7, PÁGS. 195-197, 13 DE FEBRERO DE 2011

En nuestro artículo, demostramos que un agujero negro en rotación podría ser observado de manera directa gracias a dicha técnica. Mediante cálculos asistidos por ordenador, evaluamos el efecto que la rotación de un agujero negro debería inducir sobre los rayos de luz que se propagan en sus inmediaciones. Al rotar, un agujero negro deforma el continuo espaciotemporal de sus proximidades, de forma que retuerce los campos electromagnéticos y les confiere momento angular orbital. Nuestro trabajo demostró que dicho cambio en las cualidades de la luz debería poder detectarse desde la Tierra si a tal efecto se dispusiesen los mejores telescopios actuales. Ello nos permitiría estudiar las propiedades del agujero negro y, en particular, medir su tasa de rotación (momento angular por unidad de masa), lo que nos ayudaría a validar las teorías acerca de estos objetos tan exóticos. Cabe señalar que, hasta ahora, dicho parámetro solo ha podido estimarse por medios muy indirectos y plagados de grandes incertidumbres.

En estos momentos estamos investigando la mejor manera de implementar el nuevo método en los observatorios actuales. El procedimiento no resulta demasiado complejo, pero requerirá tiempo, pues los telescopios modernos son instrumentos sumamente delicados. También estamos refinando los cálculos teóricos para incluir otras aproximaciones, así como investigando varios aspectos observacionales, como el efecto de la atmósfera en la detección. Si no surgen problemas inesperados, esperamos que la aplicación final esté lista para dentro de entre dos y cinco años.

El método propuesto abrirá las puertas a la observación de nuevos fenómenos. De la misma forma que podemos imaginar la sorpresa de Galileo al descubrir las manchas solares con su telescopio, estamos convencidos de que el uso de esta técnica en las observaciones astronómicas futuras nos guiará hacia inesperados avances en nuestra concepción del universo.

—Gabriel Molina Terriza
Departamento de física y astronomía
Universidad Macquarie
Sídney

QUÍMICA

Zeolitas, imaginación sin límites

Su relevancia técnica, el deseo por mejorar su rendimiento y las inagotables opciones de síntesis para adaptar sus propiedades han desencadenado una evolución permanente de esta extraordinaria clase de materiales

El campo de las zeolitas ha evolucionado de forma rápida y continua desde que se introdujeron las primeras zeolitas sintéticas en la década de los cincuenta del siglo xx. Una oleada de investigación en las décadas de los ochenta y noventa aportó el descubrimiento de nuevas estructuras y composiciones en su configuración, para su uso como adsorbentes, intercambiadores de iones y catalizadores en la producción de combustibles y productos químicos, así como para la protección ambiental [*véase* «Zeolitas sintéticas», por George T. Kerr; Investigación y Ciencia, septiembre de 1989]. Hasta hoy se han identificado 204 tipos de estructuras de zeolitas, aunque solo algunos de ellos se han comercializado. Pero no es oro todo lo que reluce. ¿Ha experimentado alguna vez el desconcierto de conducir en una gran metrópoli formada por calles tortuosas y estrechas? El encanto y las posibilidades de la ciudad se pueden ir al traste debido a una densa congestión de tráfico.

Una situación similar sucede en zeolitas que contienen microporos de dimensiones moleculares (inferiores a 1 nanómetro). Esta característica única, esencial para aplicaciones tradicionales como los tamices moleculares y la selección de formas, puede ser un inconveniente. Las moléculas voluminosas ven impedido su acceso, y se quedan estancadas en las aber-



Mejorar el acceso. Una partícula de zeolita estándar, que contiene principalmente microporos, se muestra en semejanza a las abigarradas calles de Damasco (*a*). Los eficientes sistemas de zeolitas nanoestructuradas se fabrican imitando la integración jerárquica de calles en una metrópoli funcional, como Barcelona (*b*) o París (*c*). Los materiales jerárquicos análogos en *b* y *c* contienen una red interconectada de microporos (calles estrechas) y meso- y macroporos mayores (avenidas). Estos últimos mejoran la accesibilidad de los microporos así como las velocidades de transferencia de masa en el interior de la partícula. Además, los dominios menores de zeolitas implican microporos más cortos y aumentan notablemente el número de bocas de microporos. Estas características resultan sumamente atractivas para las aplicaciones actuales y futuras de estos materiales.

turas de los poros o encuentran obstaculizado su paso hacia los centros activos dentro del cristal microporoso. Estas restricciones provocan una infrautilización del volumen disponible de zeolita, lo que se traduce en parámetros no óptimos relativos a actividad, selectividad o vida útil, los indicadores cruciales del rendimiento de cualquier catalizador. Este inconveniente estimuló la investigación dirigida a mejorar la accesibilidad y el transporte moleculares por medio de zeolitas con poros más anchos, o bien organizadas jerárquicamente, o ambas cosas.

Las zeolitas jerárquicas combinan la microporosidad intrínseca (y propiedades asociadas como cristalinidad, estabilidad térmica, acidez y reactividad) con una red auxiliar de meso- o macroporos interconectados, o una combinación de ambos. En lugar de las enmarañadas calles de la figura *a*, las estructuras guardan mayor semejanza con los esquemas de calles mostrados en las figuras *b* y *c*. La abundancia de nuevas estrategias de síntesis ha llevado al reciente surgimiento de una amplia gama de sistemas zeolíticos organizados de forma jerárquica, con interesantes aplicaciones potenciales. Dos estudios recientes describen métodos «de abajo arriba» para la síntesis de nuevos nanosistemas de zeolitas con tipos relacionados de estructuras, en particular cristales ultrapequeños de zeolita de tipo EMT (de Elf Mulhouse Chimie Two) y conjuntos jerárquicos de nanoláminas mesoporosas de tipo faujasita (FAU).

El grupo dirigido por Svetlana Mintova, de la Universidad de Caen y el CRNS francés, relata, en un trabajo publicado en *Science* el pasado enero, cómo el control sobre las primerísimas etapas de cristalización en sistemas coloidales resulta crucial para aislar importantes fases metaestables de tamaño nanoscópico y pureza y rendimiento elevados, evitando el uso de costosos patrones orgánicos. Esto se muestra para la zeolita de tipo EMT, un politipo hexagonal de la zeolita de tipo faujasita cúbica (FAU), que presenta un sistema tridimensional de grandes microporos (anillo con 12 miembros) y una de las menores densidades de estructura de zeolita. Un empleo más extendido de esta zeolita se ha visto impedido por la dificultad de obtener EMT pura, lo que solo es posible mediante un costoso agente (éter 18-corona-6), empleado como director de la estructura, bajo condiciones de síntesis estrictamente controladas. Mintova y sus colaboradores descubrieron el truco para «atrapar» EMT en soluciones sin patrón: calentar cuidadosamente el gel de síntesis durante solo un breve período de tiempo. Altas temperaturas o largos períodos de síntesis transforman la estructura EMT del primer producto cristalino metaestable en los de la más estable faujasita cúbica y la más densa sodalita.

Es fácil prever la posibilidad de atrapar otras fases relevantes de zeolitas mediante una revisión más profunda de las etapas tempranas de la síntesis, evitando así el uso de los reactivos orgánicos normalmente usados para la estabilización de las fases deseadas. Los logros en este trabajo van un paso más lejos. La síntesis en condiciones cercanas a las ambientales produce diminutos nanocristales de EMT (de 6 a 15 nanómetros o de 50 a 70 nanómetros, según el método de calentamiento y el tiempo de reposo, con una relación silicio-aluminio cercana a 1), a diferencia de los cristales de EMT de tamaño micrométrico obtenidos por cristalización estándar asistida con patrón orgánico. En este sistema de tamaño nanoscópico (semejante a la organización de la figura *b*), las moléculas de reactivo podrían en principio entrar a través de las abundantes aberturas de poros, debido a la presencia de una textura mesoporosa, permaneciendo en los diminutos dominios microporosos durante un tiempo muy corto.

Siguiendo un método diferente, el equipo dirigido por Wilhelm Schwieger, de la Universidad de Erlangen-Nuremberg, ha desarrollado una zeolita X de tipo FAU organizada jerárquicamente. Su trabajo fue publicado en el número de febrero de 2012 de *Angewandte Chemie International Edition*. Esta zeolita rica en aluminio, que es un adsorbente común sintetizado por medios industriales sin patrón orgánico, no se había conseguido en su forma jerárquica de forma convincente hasta ahora. Ello se ha logrado mediante un método con patrón débil concebido por el equipo de Ryong Ryoo, del Instituto de Corea para la Ciencia y la Tecnología, para otras estructuras. Schwieger y sus colaboradores demuestran que la introducción de un tensioactivo anfifílico de organosilano, el cloruro de 3-(trimetoxisilil) propil hexadecil dimetil amonio (TPHAC), en el gel de síntesis produce una disposición de las nanoláminas de

zeolita X semejante a un castillo de naipes. El conjunto presenta una red interconectada de microporos (diámetro de 0,74 nanómetros), mesoporos intracristalinos (7 nanómetros) y anchos macroporos intersticiales (200 nanómetros) situados entre los apilamientos de nanoláminas. En consecuencia, el área superficial externa del conjunto jerárquico es más de 10 veces superior al de la zeolita X estándar. Schwieger y sus colegas sugieren que los sistemas de poros se hallan dispuestos de forma ideal para que las moléculas penetren, reaccionen y salgan, de forma similar a una metrópoli bien diseñada con una eficiente red de autopistas, calles y callejones (*figura c*). Además, señalan que la zeolita X es el primer sistema en el que el uso de TPHAC da lugar a una morfología del tipo de nanoláminas. De hecho, la preparación de conjuntos de nanoláminas de otras estructuras de zeolitas, como las MFI, ha precisado el uso de tensioactivos con múltiples grupos de amonio cuaternario.

Aunque las contribuciones de los grupos de Mintova y Schwieger tienen diferentes puntos de partida y ponen en práctica métodos opuestos de síntesis, comparten el mismo objetivo: adaptar las propiedades de las zeolitas para la obtención de materiales con mejores características en aplicaciones específicas. En un siguiente paso, las prometedoras propiedades de estos materiales avanzados deberían explotarse en estudios de laboratorio enfocados sobre todo a conversiones catalíticas, separaciones y procesos de adsorción. Por ejemplo, la económica síntesis de la altamente accesible EMT pide a gritos estudios catalíticos en reacciones gobernadas actualmente por la zeolita USY de tipo FAU. De forma equivalente, la obtención de una zeolita X organizada jerárquicamente abre perspectivas para su uso como catalizador principal en técnicas emergentes de conversión de biomasa, así como en aplicaciones que necesitan una rápida captación o liberación de iones o moléculas. Suponiendo que se obtengan resultados sobresalientes en cualquiera de las futuras investigaciones, la última ambición es su implementación técnica.

Para que esos materiales avanzados se utilicen en la industria, se necesita un cambio de mentalidad; debe cambiarse de escala, pasar de una producción de gramos a una de toneladas y de polvo a un material moldeado, mediante procedimientos baratos que permitan emplear las instalaciones existentes de fabricación de zeolitas. Las síntesis asistidas por reactivos exóticos y patrones orgánicos, como los tensioactivos ya mencionados, constituyen un excelente campo de exploración sobre los límites de estos fascinantes materiales. No obstante, su implementación práctica y sostenible no parece viable en la actualidad, debido a su limitada disponibilidad, alto coste y requisitos de seguridad, a menudo subestimados. Por otro lado, las características especiales descubiertas a través de vías con un coste prohibitivo proporcionan nuevas perspectivas y agudizan nuestra capacidad para diseñar materiales análogos con un coste rentable. Este concepto está magníficamente ilustrado en el trabajo de Mintova y sus colaboradores. Teniendo en cuenta estas rigurosas líneas, se piensa que una inteligente secuencia de modificaciones de bajo coste posteriores a la síntesis, aplicadas en muestras comerciales producidas industrialmente (un método «de arriba abajo»), se convertirá en una fuente importante de zeolitas estructuradas jerárquicamente, de interés industrial. En fecha reciente, nuestro grupo ha publicado en *Advanced Functional Materials* un estudio que muestra que, en principio, cada zeolita estándar puede ser corregida hasta su forma jerárquica mediante la aplicación de la combinación correcta de tratamientos ácidos y básicos, cuyo uso se ha demostrado a gran escala.

En conclusión, el éxito perdurable y el brillante futuro de las zeolitas en la investigación académica y la práctica industrial procede de la naturaleza darwinista de su diseño, que se adapta constantemente a unas condiciones en cambio continuo. El amplio abanico de opciones para su proceso de síntesis y tratamiento posterior ofrece un mayor control de la organización nanoestructural, proporcionando propiedades para aplicaciones específicas. Esta versatilidad explica que un número limitado de estructuras pueda cubrir todo el espectro de las actuales aplicaciones industriales. Ninguna familia de materiales ha eclipsado hasta ahora la impresionante combinación de características inherentes a las zeolitas, pero estoy seguro de que todos estamos abiertos a las sorpresas.

—Javier Pérez-Ramírez
Instituto de Química y Bioingeniería
Instituto Politécnico Federal Suizo
Zúrich

Artículo original publicado en *Nature Chemistry*, vol. 4, págs. 250-251, 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

MATERIALES

Control del daño

Un estudio revela que la rotura de las telas orbiculares corresponde a un proceso no lineal, debido a la estructura jerarquizada de las fibras proteicas de seda. Ello puede inspirar a los ingenieros que proyectan estructuras aéreas ligeras y resistentes

Las telas de araña constituyen una notable proeza de la ingeniería de materiales. Sus propiedades mecánicas, optimizadas por la evolución durante 400 millones de años, han despertado un gran interés entre los físicos y los ingenieros que tratan de entender, copiar y mejorar el diseño de esta singular estructura natural para fabricar estructuras aéreas ligeras.

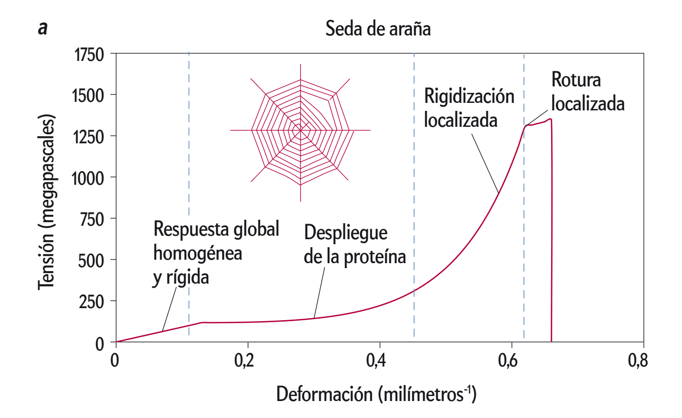
En un artículo reciente publicado en *Nature*, Markus Buehler, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores ofrecen algunas ideas sobre la relación entre la función y la estructura de las telas de araña, basándose en la estructura jerarquizada de los hilos de seda. A través de varios experimentos y de la modelización de las estructuras, demuestran que las propiedades mecánicas de los hilos de seda de las arañas y de las telas se deben a una respuesta no lineal de la deformación de las fibras. Este comportamiento no lineal tiene el efecto favorable de localizar las roturas en regiones específicas de la tela de araña cuando impacta una presa que vuela. (Si la respuesta fuera elástica, o elastoplástica, no se produciría este efecto amortiguador y se rompería toda la estructura.)

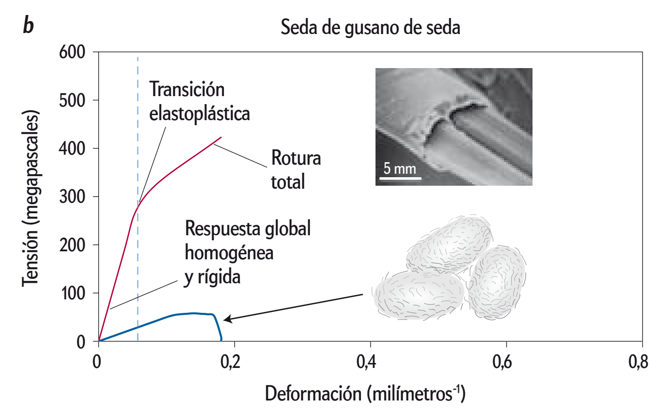
¿Cómo se origina ese comportamiento no lineal a partir de la estructura proteica de la seda? La respuesta guarda relación con la estructura proteica de las fibras de seda, en las que se generan nanodominios, como las regiones cristalinas de hojas β, que se reorientan y se despliegan con tensiones bajas. Cuando la tensión aumenta, estas regiones cristalinas responden mediante la formación de enlaces de hidrógeno que refuerzan localmente la estructura. Si se aumenta más la tensión, la fibra acaba rompiéndose. Es esta rigidización no lineal de la fibra lo que origina la localización del daño, y lo que permite que el resto de la estructura pueda seguir realizando su función.

Cabe destacar que las propiedades mecánicas optimizadas de las fibras de seda de las arañas pueden trasladarse a la compleja arquitectura de las redes. El comportamiento y la resiliencia de la red constituyen un compromiso entre el ablandamiento lineal y el posterior endurecimiento de las fibras individuales, responsables del control de una rotura local de la red en vez del fallo de toda la estructura. Este diseño permite que la red siga operativa a pesar de la pérdida de grandes trozos de su estructura. Es importante darse cuenta de que un fallo de toda la estructura representaría una desventaja evolutiva para la araña, por la correspondiente incapacidad de capturar presas y la penalización metabólica que implica la reconstrucción de la red.

Los hallazgos de Buehler y su equipo están basados en el trabajo de Fritz Vollrath, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores. En 1995 observaron que las relaciones entre la tensión y la deformación de las redes exhibían un comportamiento dependiente del tiempo cuando recibían el impacto de un insecto. De acuerdo con este modelo, los radios, más rígidos y pretensionados, de la red dominan las propiedades mecánicas de la misma, mientras que las fibras espirales, menos rígidas, son las responsables de la diferencia de rigidez radial y circunferencial, lo que permite el amortiguamiento aerodinámico y la captura del insecto.

El comportamiento no lineal de las redes es distinto del de los capullos del gusano de seda, estructuras ovoides diseñadas para proteger las larvas del insecto del ambiente externo. Las fibras de los capullos son materiales compuestos de proteína-proteína que disipan la ener-





Comportamiento mecánico en un ensayo de tracción con fibras de seda de distintas especies. (*a*) Curva teórica de tensión y deformación para una fibra de seda de araña en la que se muestran las distintas fases de la respuesta tensional. Como ilustra el dibujo de la telaraña, las arañas explotan la no linealidad de sus fibras de seda para localizar el daño en la red. (*b*) Datos experimentales de la fibra de seda del gusano de seda; fibroína (*rojo*) y capullo (*azul*). El inserto corresponde a la microscopía electrónica de barrido de una fibra de seda del capullo, compuesta por fibras de fibroina embebidas en una matriz blanda. Esta estructura proporciona a los capullos una escasa resistencia a la tracción. A diferencia de las arañas, los gusanos de seda explotan su seda para la protección y resistencia al impacto.

FUENTE: «MATERIALS: SURPRISING STRENGTH OF SILKWORM SILK», POR ZHENGZHONG SHAO Y FRITZ VOLLRATH EN *NATURE*, VOL. 418; AGOSTO DE 2002 (*microscopía*).

gía mediante una deformación elastoplástica lineal. Este tipo de respuesta actúa sobre toda la estructura del capullo, mejorando su tenacidad de fractura y, en consecuencia, las posibilidades de supervivencia del animal que está mudando en su interior. La diferencia entre las fibras de seda de las arañas y las del gusano de seda se debe a las distintas secuencias de los aminoácidos de sus respectivas proteínas. Las fibras del gusano de seda poseen un mayor contenido de dominios cristalinos que las de las arañas, por lo que no exhiben la respuesta no lineal que se observa en las redes orbiculares de estas.

Las ideas que aplican los ingenieros en el diseño de estructuras espaciales ligeras todavía se hallan en sus albores. El diseño de este tipo de estructuras se centra actualmente en su comportamiento mecánico y fabricación, pero también deberían considerarse la funcionalidad mecánica y las limitaciones energéticas. En este sentido, las sedas de araña pueden servir de modelo e inspiración porque su singular diseño está optimizado para el comportamiento mecánico y los recursos energéticos disponibles. Existe un interés adicional por este material natural porque las fibras son completamente degradables y reciclables y, además, su fabricación es respetuosa con el ambiente.

También otros materiales naturales, como los ligamentos y los tendones, exhiben un comportamiento elástico no lineal. Con una perspectiva más amplia, este paradigma podría extenderse al diseño de biomateriales para el estudio de células y tejidos. El comportamiento no lineal entre tensión y deformación reviste especial importancia durante el desarrollo de los tejidos, donde la estructura, la distribución tensional y las señales biológicas asociadas resultan críticos para impedir fallos prematuros catastróficos que pueden conducir a un desarrollo tisular anormal. La habilidad para diseñar estructuras con modos de fallo local o, quizá, regiones que sean más accesibles para la deformación de células específicas o enzimas, puede servir para definir plataformas de biomateriales con funciones controladas topográficamente. A este fin, el uso combinado de experimentos in situ y modelización puede servir para proporcionar nuevas pautas de diseño que incorporen los principios que operan en los materiales naturales para los propósitos de la ingeniería de materiales.

—Fiorenzo G. Omenetto
y David L. Kaplan
Departamento de ingeniería biomecánica
Universidad Tufts
Massachusetts

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 11, págs. 273-274, 2012.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

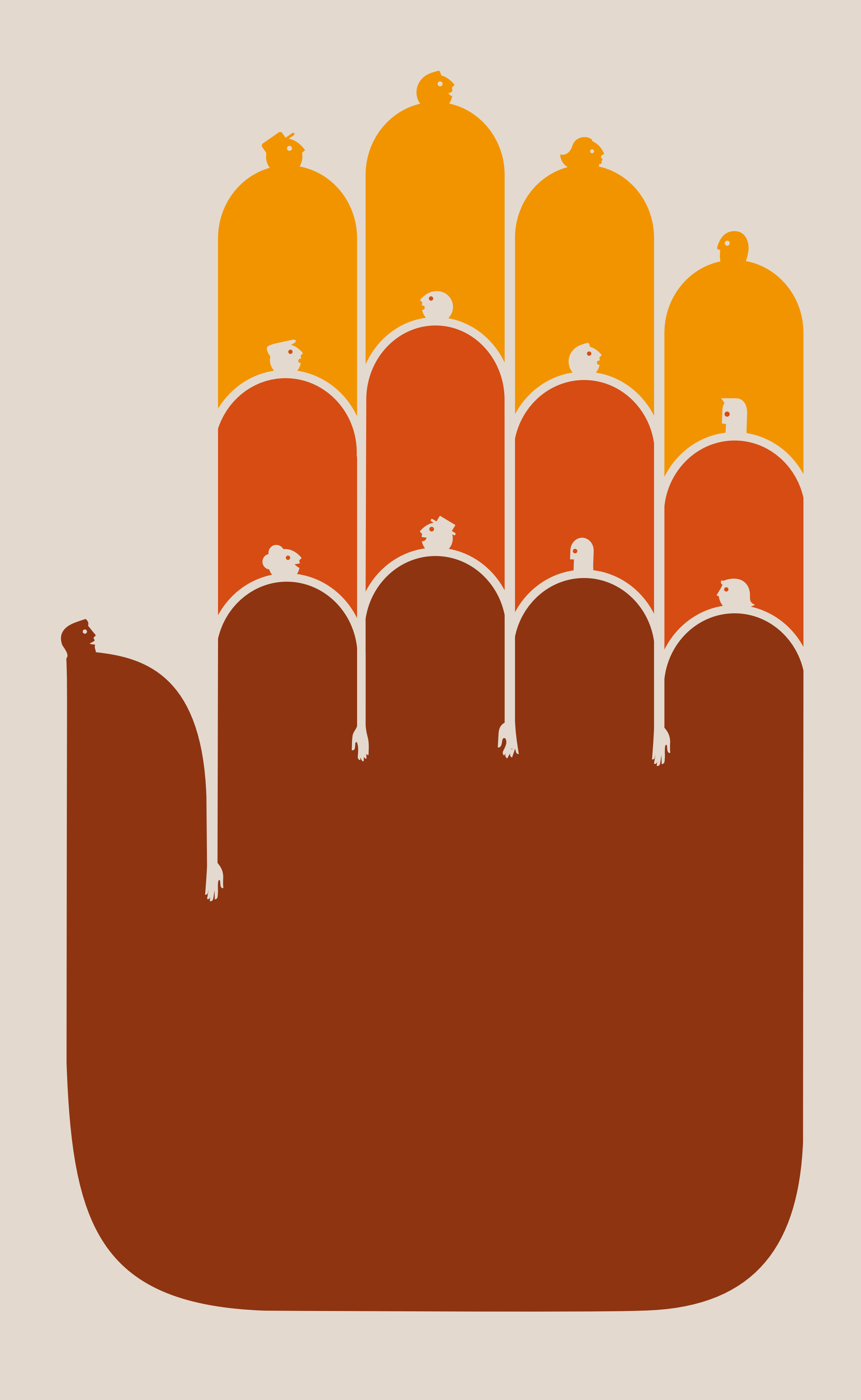
EVOLUCIÓN

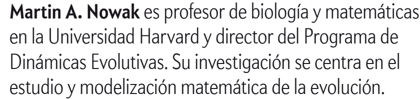
¿POR QUÉ COOPERAMOS?

El altruismo, lejos de suponer una fastidiosa anomalía de la evolución, se cuenta entre sus arquitectos primordiales

Martin Nowak

NOMA BAR




Martin A. Nowak es profesor de biología y matemáticas en la Universidad Harvard y director del Programa de Dinámicas Evolutivas. Su investigación se centra en el estudio y modelización matemática de la evolución.



En abril del año pasado, cuando los reactores de la central nuclear de Fukushima estaban a punto de fundirse tras el terremoto y posterior tsunami que azotaron el país, un operario de unos veinte años se mostró dispuesto a regresar a la central para ayudar a controlar la situación. Era consciente de que el aire se encontraba envenenado y de que su decisión tal vez le privase de casarse o tener hijos, a quienes podría transmitir graves problemas de salud. Aun así, franqueó las puertas de la central, se sumergió en un ambiente cargado de radiactividad y se puso a trabajar, sin más compensación que su módico salario habitual. «Solo algunos de nosotros podemos hacer este trabajo», explicó a *The Independent* el trabajador, quien insistió en que se respetase su anonimato. «Soy joven y soltero, y siento que es mi deber ayudar a resolver este problema.»

Aunque no siempre se manifiesten de forma tan épica, los ejemplos de comportamiento altruista abundan en la naturaleza. Las células de un organismo se coordinan para limitar su división, lo que previene la aparición de cáncer; las obreras de numerosas especies de hormigas sacrifican su propia fecundidad para servir a la reina y a su colonia; las leonas de una manada se prestan a amamantar a los cachorros de otras. Los humanos nos ayudamos en un sinfín de actividades, desde procurarnos sustento hasta buscar pareja o defender el territorio. Y aunque aquellos dispuestos a colaborar no siempre pongan su vida en peligro, sí corren el riesgo de reducir su propio éxito reproductivo en beneficio de otros.

El problema de la cooperación ocupa desde hace decenios a los biólogos, quienes se han esforzado en explicarla a la luz de la tesis dominante en la teoría de la evolución, «cuyas garras y dientes se encuentran teñidos de rojo», como tan vigorosamente lo expresara Alfred, Lord Tennyson. Charles Darwin, en su defensa de la selección natural (según la cual los individuos mejor dotados se reproducen con mayor rapidez, de modo que contribuyen más que otros congéneres a la generación siguiente), calificó dicha competición como «la lucha más inclemente por la vida». Llevado a sus últimas consecuencias lógicas, el argumento implica que nunca deberíamos ayudar a un rival. De hecho, un individuo estaría obrando de la manera correcta si engaña o abusa para seguir adelante: con tal de vencer, todo vale en el juego de la vida.

¿A qué se debe entonces que las conductas altruistas constituyan un fenómeno tan extendido? A lo largo de los dos últimos decenios, he estado aplicando las herramientas que proporciona la teoría de juegos a fin de explicar esta aparente paradoja. Mis investigaciones indican que, en lugar de oponerse a la competición, la cooperación ha operado desde el primer momento junto a ella: ambas han perfilado la evolución de la vida en la Tierra, desde las primeras células hasta *Homo sapiens*. La vida no se limita a una lucha por la supervivencia, sino que es también una «colaboración por la supervivencia». Por otro lado, en ningún otro caso ha sido la influencia evolutiva de la cooperación tan acusada como en el ser humano. Nuestros descubrimientos insinúan la razón por la que ello debería ser así, al tiempo que subrayan que, al igual que la ayuda mutua ha resultado clave para nuestro éxito en el pasado, también será vital para nuestro futuro.

DE ADVERSARIO A ALIADO

Comencé a interesarme por el problema de la cooperación allá por 1987, cuando era un estudiante de doctorado de matemáticas y biología en la Universidad de Viena. Durante una estancia con otros compañeros y profesores en los Alpes, tuve noticia del *dilema del prisionero*, una paradoja de teoría de juegos que ilustra con gran elegancia la razón por la que la cooperación ha causado tanta perplejidad entre los biólogos evolutivos. El dilema reza como sigue: dos individuos han sido detenidos, acusados de conspirar para perpetrar un crimen. La policía interroga a cada uno de ellos por separado y les propone a los dos el mismo trato: «Si incrimina a su compañero y él guarda silencio, será usted condenado a un año de prisión y él, a cuatro. Si delata a su cómplice pero él también lo inculpa a usted, ambos serán sentenciados a tres años de cárcel. Por último, si ninguno de ustedes acusa al otro, cada uno recibirá un pena de dos años».

Dado que cada prisionero es interrogado por separado, ninguno de ellos sabe si su compañero callará o lo incriminará. Si representamos todas las posibilidades en una matriz, comprobaremos que, desde el punto de vista de cada sospechoso por separado, la mejor apuesta consiste en acusar al otro: haga este lo que haga, delatarlo conlleva siempre una pena menor que permanecer en silencio. Pero, dado que ambos seguirán el mismo razonamiento, acabarán recibiendo uno de los tratos menos favorables (sendas condenas a tres años), en lugar de los dos años de prisión que podrían haber logrado si hubiesen apostado por cooperar.

El dilema del prisionero me sedujo de inmediato por su capacidad para sondear la relación entre conflicto y cooperación. Junto con Karl Sigmund, por entonces mi director de tesis, desarrollamos varias simulaciones numéricas que aplicaban el di-

EN SÍNTESIS

Solemos pensar que la evolución implica una lucha sin cuartel por la supervivencia. En realidad, la cooperación ha sido una de sus fuerzas motrices.

Existen cinco mecanismos genéricos que permiten que el comportamiento colaborativo emerja en toda clase de organismos, desde las bacterias a los humanos.

El ser humano es la especie más cooperativa de todas. Ello se debe al mecanismo de reciprocidad indirecta, basado en la reputación y en la ayuda al altruista.

lema del prisionero a comunidades integradas por un gran número de individuos, en lugar de los dos del ejemplo clásico. Gracias a este método, comprobamos que la estrategia adoptada por tales comunidades se caracterizaba por ciclos sucesivos de defección y cooperación. De hecho, identificamos un mecanismo que parecía vencer el comportamiento egoísta asociado a la selección natural y que acababa por inducir, en individuos que deberían mostrar un comportamiento desleal, una conducta generosa.

Nuestros modelos partían de una distribución aleatoria de egoístas y cooperadores. Tras cada ronda, los vencedores engendraban descendencia y esta participaba en la tanda siguiente. En esencia, la progenie se atenía a la estrategia de sus progenitores, si bien podía verse desviada de ella como consecuencia de mutaciones aleatorias. En el curso de la simulación descubrimos que, tras unas pocas generaciones (cada generación se correspondía con una ronda), todos los miembros de la comunidad habían optado por un comportamiento egoísta. Sin embargo, pocas generaciones después afloraba una nueva estrategia: los individuos comenzaban a cooperar y acababan por imitar las acciones de sus oponentes, un mecanismo que en teoría de juegos se conoce como «toma y daca» (*tit for tat*). Dicho cambio desembocaba con rapidez en comunidades integradas en su mayoría por cooperadores.

Ese mecanismo (la evolución hacia la cooperación entre individuos que se encuentran reiteradamente) recibe el nombre de reciprocidad directa. Los murciélagos vampiros proporcionan un ejemplo impresionante al respecto. El día que uno de ellos no se hace con ninguna presa, de vuelta al refugio suplica alimento a sus compañeros saciados. Con suerte, algún murciélago decidirá compartir su sanguinolento festín y lo regurgitará en la boca del hambriento. Los vampiros viven en grupos estables y regresan cada día al refugio, por lo que los miembros de la comunidad se congregan de manera rutinaria. Varios estudios han demostrado que estos quirópteros recuerdan quién los ha ayudado en caso de necesidad y, llegado el día, no es raro que devuelvan el favor al compañero que en el pasado mostró un comportamiento generoso hacia ellos.

Un aspecto aún más interesante de nuestras primeras simulaciones por ordenador fue que pusieron de manifiesto la existencia de varias clases de reciprocidad directa. En apenas veinte generaciones, la estrategia inicial de toma y daca dio paso a otra más generosa aún, en la que los jugadores llegaban a mostrarse altruistas incluso con quienes en el pasado habían manifestado un comportamiento desleal. En esencia, habíamos presenciado la evolución hacia el perdón: una estrategia de reciprocidad directa que permitía a los jugadores pasar por alto un error esporádico.

Además de la reciprocidad directa, más tarde identifiqué otros cuatro mecanismos responsables de la evolución de la cooperación. Durante los últimos años se han publicado miles de artículos en los que se describen infinidad de situaciones que posibilitan la prevalencia evolutiva de los individuos dispuestos a cooperar. Todos los casos documentados hasta ahora pertenecen a una o más de esas cinco categorías.

Otro mecanismo que propicia la cooperación, denominado selección espacial, surge cuando altruistas y egoístas no se encuentran entremezclados de modo uniforme. Los vecinos (o los amigos, en una red social) tienden a ayudarse, de modo que en una población con pequeñas parcelas de individuos cooperadores, estos se agruparán en colectivos cada vez mayores y acabarán prevaleciendo sobre los de oportunistas. El mecanismo de selección espacial opera incluso en organismos muy simples. En las levaduras, existen células «cooperadoras» que producen una enzima necesaria para digerir azúcares; una acción que llevan a cabo a costa de sí mismas. Entretanto, las células «oportunistas» emplean las enzimas sintetizadas por las primeras, en lugar de producirlas por sus propios medios. En estudios dirigidos por Jeff Gore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y, de manera independiente, por Andrew Murray, de la Universidad Harvard, se observó que cuando las levaduras crecían en poblaciones muy entremezcladas, prevalecían las células desleales. En cambio, en cultivos que contenían grupos separados de cooperadoras y de explotadoras, las primeras acababan por imponerse sobre las segundas.

Puede que uno de los mecanismos más intuitivos a la hora de describir la evolución de conductas desinteresadas se corresponda con la cooperación entre individuos relacionados genéticamente; es decir, la selección por parentesco. En tales casos, un miembro de la comunidad se sacrifica por sus parientes en razón de su dotación genética común: aunque el individuo se arriesgue a reducir su capacidad reproductiva, fomenta la transmisión de los genes que comparte con sus parientes. John B. S. Haldane, biólogo del siglo xx y proponente de la idea de selección por parentesco, lo expresó así: «Sería capaz de echarme al río para salvar a dos hermanos o a ocho primos», aludiendo a que con los hermanos compartimos un 50 por ciento de nuestro ADN, mientras que nuestros primos solo tienen con nosotros un 12,5 por ciento en común. (Calcular la eficacia biológica de la selección por parentesco constituye una tarea bastan-

FUNDAMENTOS

Defección natural

El dilema del prisionero, una paradoja de teoría de juegos, ilustra con elegancia la razón por la que no deberíamos esperar comportamientos altruistas en la naturaleza. Dos detenidos han sido acusados de conspirar para perpetrar un crimen. La condena que se le imponga a cada uno dependerá de si elige delatar o encubrir al compañero (*tabla*). Dado que ninguno de los dos sabe cómo obrará el otro, la decisión más racional (aquella que promete la pena más corta) es siempre la delación. Esa manera de proceder, sin embargo, les supondrá penas mayores que si hubiesen apostado por cooperar.

	DETENIDO 2: COOPERA (encubre)	DETENIDO 2: DELATA (confiesa)
DETENIDO 1: COOPERA (encubre)	2 años de prisión 2 años de prisión	4 años de prisión 1 año de prisión
DETENIDO 1: DELATA (confiesa)	1 año de prisión 4 años de prisión	3 años de prisión 3 años de prisión





Echar una mano: Dos hormigas cooperan para transportar una hoja hasta el hormiguero (*1*). Al regular su propia división, las células evitan la aparición de cáncer (*2*). Las leonas colaboran entre sí para criar a sus cachorros (*3*). Los macacos japoneses se despiojan mutuamente; con ello, mejora su reputación en el grupo (*4*).

TIM FLACH, GETTY IMAGES (*hormigas*); REBECCA YALE, GETTY IMAGES (*leones*)

te compleja que ha desorientado a no pocos investigadores. Existe en la actualidad un intenso debate sobre los aspectos matemáticos de la teoría de selección por parentesco.)

Un cuarto mecanismo que fomenta la emergencia de la cooperación es la reciprocidad indirecta, muy distinta de la directa. En este caso, un individuo decide si ayudar o no a otro a partir de la reputación del necesitado: quienes gozan de fama de altruistas pueden llegar a recibir auxilio incluso por parte de un completo desconocido. Podemos decir que, en lugar de razonar según la máxima «te rascaré la espalda si tú me la rascas a mí», esta estrategia se basa más bien en «te rascaré la espalda a ti y algún otro ya me la rascará a mí». Entre los macacos japoneses, los monos de bajo estatus social que despiojan a otros de posición elevada (de buena reputación) pueden aumentar su prestigio —y, en consecuencia, la probabilidad de ser despiojados por otros— solo por el hecho de ser vistos en compañía de los líderes.

Por último, un individuo puede obrar con abnegación no para ayudar a un congénere, sino en pos del bien común: un medio de arraigo de la cooperación conocido como selección de grupo. Dicho mecanismo fue ya identificado por el propio Darwin en *El origen del hombre*, donde señalaba: «Una tribu integrada por muchos miembros [...] siempre dispuestos a ayudarse mutuamente y a sacrificarse por el bien común vencería a la mayoría de las demás tribus; esto sería selección natural». Desde entonces, los biólogos han debatido con gran fervor sobre la posibilidad de que la selección natural favorezca la cooperación para mejorar así el potencial reproductivo del grupo. Los modelos matemáticos desarrollados por varios investigadores, entre quienes me cuento, han contribuido a mostrar que la selección natural puede operar a múltiples niveles, desde el genético hasta la totalidad de la especie, pasando por comunidades de individuos. Los trabajadores de una empresa, por ejemplo, compiten entre sí para ascender en la escala corporativa, pero también cooperan a fin de asegurar el éxito de su compañía frente a otras.

UNO PARA TODOS

Los cinco mecanismos que gobiernan la emergencia de la cooperación operan en toda clase de organismos, desde las amebas hasta las cebras (e incluso se extienden, en algunos casos, a los genes y otros componentes celulares). Esta universalidad nos lleva a pensar que la cooperación ha sido, desde el principio, una fuerza motriz en la evolución de la vida en la Tierra. Además, existe un grupo en el que los efectos de la cooperación se han demostrado especialmente profundos: la humanidad. Millones de años de evolución han transformado a un simio lento y casi inerme en la criatura más influyente del planeta, una especie capaz de sondear las profundidades del océano, explorar el espacio y difundir en apenas un instante sus logros al resto del mundo. Tales hazañas las hemos logrado a fuerza de trabajar juntos. Los humanos conformamos la más cooperadora de todas las especies; somos, por así decirlo, supercooperadores.

Dado que los cinco mecanismos descritos se observan en toda la naturaleza, cabe preguntarnos a qué se debe que los humanos cooperemos más que cualquier otra especie. A mi modo de ver, los humanos, más que ningún otro animal, colaboran a través del mecanismo de reciprocidad indirecta, basado en la reputación. ¿Por qué? Porque solo nuestra especie dispone de un lenguaje plenamente desarrollado —y, por extensión, de un nombre para cada uno de sus individuos—, lo cual permite intercambiar información sobre cualquiera, desde los miembros más próximos y la familia hasta completos desconocidos que viven en las antípodas. Nos obsesiona saber quién hace qué, a quién y por qué. Hemos de saberlo para mejorar nuestro estatus en la red social que nos envuelve. Varios estudios han demostrado que, desde las asociaciones benéficas a las que donamos dinero hasta las empresas que patrocinamos, nuestras decisiones se basan, en parte, en la reputación. Rebeca Henderson, una compañera de Harvard experta en estrategias competitivas en el mundo empresarial, apunta que Toyota logró en los años ochenta cierta ventaja sobre otros fabricantes debido a su reputación de buen trato hacia sus proveedores.

La interacción entre lenguaje y reciprocidad indirecta induce una evolución cultural rápida, lo cual constituye el meollo de nuestra adaptabilidad como especie. A medida que la población mundial crece y el clima cambia, habremos de aprovechar esa adaptabilidad y dar con nuevas fórmulas de colaboración si queremos salvar el planeta y a sus habitantes. A la vista de nuestro historial medioambiental, no parecen muchas las probabilidades de lograr dicho objetivo. También aquí la teoría de juegos puede arrojar luz sobre el problema; en particular, de la mano de ciertos dilemas cooperativos que atañen a más de dos juga-





GETTY IMAGES (*células*); OSCAR TARNEBERG, GETTY IMAGES (*monos*)

dores conocidos como juegos de bienes públicos [*véase* «La economía del juego limpio», por K. Sigmund, E. Fehr y M. A. Nowak; Investigación y Ciencia, marzo de 2002]. En ellos, todos los integrantes de un grupo se benefician de la actitud cooperativa de cada uno de sus miembros; pero, mientras que todo lo demás permanezca igual, un individuo podrá aumentar su provecho personal si cesa de colaborar y se decanta por el oportunismo. Aunque su deseo es que los demás cooperen, para él la opción «inteligente» es explotarlos. El problema reside en que todos los miembros del grupo piensan de igual manera, de modo que lo que empezó como cooperación acabará en defección.

Un ejemplo clásico de la clase de dilemas descrita es la *tragedia de los comunes*, propuesta en 1968 por el ecólogo Garrett Hardin. En ella, varios ganaderos comparten las tierras de pastoreo. Sin embargo, cada uno de ellos permite que sus reses sobreexploten los pastos comunales, de modo que acaban por destruir el bien común y, por tanto, también el propio. El paralelismo con los problemas que hoy plantea la explotación de los recursos naturales, desde el petróleo hasta el agua potable, resulta evidente. Si, cuando se trata de custodiar los recursos de la colectividad, los cooperadores tienden al oportunismo, ¿cómo preservar el capital ecológico del planeta para las generaciones futuras?

TODOS PARA UNO

Por fortuna, queda un resquicio para la esperanza. Una serie de experimentos dirigidos por Manfred Milinski, del Instituto Max Planck de Biología Evolutiva de Plön, y sus colaboradores ha revelado la existencia de varios factores que motivan una administración cabal del bien común. Los investigadores otorgaron 40 euros a cada uno de los sujetos y les hicieron participar en un juego por ordenador que consistía en emplear ese dinero para mantener el clima bajo control. En cada ronda, debían donar parte de su dinero a un fondo común. Si, pasadas diez tandas, el fondo contaba con 120 euros o más, el clima quedaría a salvo y los jugadores podrían guardar para sí el dinero sobrante. En caso contrario, sobrevendría la catástrofe y todos perderían todo su dinero.

Aunque los jugadores a menudo perdían y el fondo se quedaba corto por unos pocos euros, los investigadores observaron que en cada ronda iban apareciendo diferencias de comportamiento que parecían apuntar a las razones de la generosidad. En primer lugar, los jugadores se mostraban más altruistas cuando recibían información precisa y fiable acerca de la investigación sobre el clima. Ello revela que, para sacrificarse por el bien común, las personas necesitan convencerse de que el problema realmente existe. Por otro lado, su generosidad aumentaba cuando se les permitía hacer públicos sus donativos, en lugar de anónimos; es decir, cuando entraba en juego su reputación. En la misma línea, otro estudio realizado por investigadores de la Universidad de Newcastle halló que las personas tienden a ser más generosas cuando se creen observadas.

Estos factores entran en juego todos los meses cuando recibo la factura de gas. En ella se compara el consumo de mi hogar con el consumo medio de las casas de mi vecindario, en las afueras de Boston, así como con el de los hogares más eficientes. La comparación con otros vecinos motiva a mi familia para ahorrar gas: cada invierno, procuramos rebajar la temperatura de la vivienda en un grado Fahrenheit.

Con todo, las simulaciones de procesos evolutivos demuestran que toda cooperación es intrínsecamente inestable: cualquier período de prosperidad colaborativa desembocará sin remedio en uno de desapego por el grupo. A pesar de ello, el espíritu altruista siempre parece restablecerse por sí solo; de algún modo, algo provoca que nuestras brújulas morales se alineen de nuevo hacia un mismo norte. Los períodos de cooperación y defección resultan reconocibles en los altibajos de la historia humana, en los sistemas políticos y en los ciclos económicos. Desconocemos en qué punto se encuentra la humanidad en este momento, pero no cabe duda de que podríamos coordinarnos mejor para resolver los problemas más acuciantes a los que se enfrenta la humanidad. La teoría de juegos ofrece propuestas. Los líderes políticos deberían tomar nota del mecanismo de reciprocidad indirecta, así como de la importancia de la información y la reputación a la hora de limitar los comportamientos oportunistas. Y deberían aprovechar ese potencial para fomentar la cooperación en el más importante de todos los juegos de bienes públicos: lograr que siete mil millones de personas conserven los cada vez más escasos recursos del planeta Tierra.

PARA SABER MÁS

¿Tiene recompensa el altruismo? Jean-Paul Delahaye en *Investigación y Ciencia*, n.º 221, febrero de 1995.

La evolución de la cooperación: El dilema del prisionero y la teoría de juegos. Robert Axelrod. Alianza Editorial, 1996.

Five rules for the evolution of cooperation. Martin A. Nowak en *Science*, vol. 314, págs. 1560-1563, 8 de diciembre de 2006.

Super cooperators: Altruism, evolution, and why we need each other to succeed. Martin A. Nowak y Roger Highfield. Free Press, 2012.

ASTROFÍSICA

LA BENEVOLENCIA DE LOS AGUJEROS NEGROS

El agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea podría explicar la existencia y habitabilidad de la Tierra

Caleb Scharf

Nuestro paso por este lugar, por este rincón microscópico del cosmos en el que vivimos, será breve. Con un desprecio absoluto por nuestros anhelos y necesidades, la naturaleza actúa a escalas de espacio y de tiempo que escapan a nuestra comprensión. Quizá solo podamos buscar consuelo en nuestra infinita capacidad para formular preguntas y buscar respuestas sobre el lugar en que nos encontramos. Una de esas cuestiones versa sobre las profundas conexiones entre nuestras circunstancias particulares y el majestuoso sistema universal que forman las estrellas, las galaxias y los agujeros negros.

Son muchos los fenómenos cósmicos que pueden influir sobre la vida, pero unos revisten más importancia que otros. Los agujeros negros pertenecen a esa lista debido a su singular naturaleza. Ningún otro objeto del universo se muestra tan eficiente a la hora de convertir materia en energía. Ningún otro actúa como un gigantesco cañón de riel giratorio, capaz de lanzar materia a casi la velocidad de la luz a decenas de miles de años luz. Además, los agujeros negros engullen materia como nada más lo hace. Y, al igual que los comedores de feria, suelen ingerir su alimento a enormes bocados, en lugar de picar con regularidad.

El material que se precipita hacia un agujero negro no lo hace en silencio. Al acercarse al horizonte de sucesos, se mueve a velocidades muy elevadas y, si el agujero negro rota sobre sí mismo, girará con gran rapidez a su alrededor. Si, en su camino, esa materia colisiona con cualquier otra cosa, existe la posibilidad de que se libere una enorme cantidad de energía cinética, convertida en el movimiento de partículas atómicas y subatómicas, y radiación electromagnética. Esas partículas y fotones se generan bastante antes de que la materia alcance el horizonte de sucesos, por lo que pueden escapar de la atracción del agujero negro. En una analogía un tanto burda, podríamos comparar este fenómeno con el agua que fluye ruidosamente por el desagüe de una bañera: conforme el líquido cae, choca contra las moléculas del aire; parte de su energía cinética se convierte en ondas sonoras, las cuales se desplazan más rápido que el agua y escapan. En tales episodios, la energía expulsada desde un agujero negro gigante puede ejercer efectos de muy largo alcance sobre la galaxia circundante.

Traducido y adaptado de Gravity's engines: How bubble-blowing black holes rule galaxies, stars, and life in the cosmos, *de Caleb Scharf. Por acuerdo entre* Scientific American *y Farrar, Straus & Giroux, LLC.*



Última bocanada: El disco de materia que cae en un agujero negro emite radiación muy intensa y lanza ráfagas de plasma a alta velocidad hacia la galaxia circundante.

Caleb Sharf es director del Centro de Astrobiología de la Universidad Columbia en Nueva York.



Al referirse a la materia que alimenta los agujeros negros supermasivos, los astrónomos hablan de «ciclos de trabajo», como los de una lavadora. La velocidad del ciclo de trabajo de un agujero negro nos informa sobre la rapidez con la que pasa de engullir materia a entrar en reposo. Ahora mismo, el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea se encuentra en calma, pero de tanto en tanto reanuda su actividad. Los astrónomos han inferido su ciclo de trabajo y han comprobado que su valor no solo guarda un vínculo con el aspecto global de la galaxia, sino que aporta datos de gran interés sobre la manera en que nuestro sistema solar se las arregla para albergar vida.

EL COLOR DE NUESTRA GALAXIA

Los sondeos astronómicos indican que el ciclo de trabajo de un agujero negro gigante se relaciona con la población estelar de la galaxia que lo aloja. Probablemente, los mismos procesos que lanzan materia hacia un agujero negro —y que, por tanto, determinan su ciclo de trabajo— influyen en la clase de estrellas que habitan la galaxia. Pero, por otro lado, la energía que brota de un agujero negro en el pico de su ciclo de trabajo puede también aderezar el contenido estelar de la galaxia.

Las estrellas de una galaxia pueden ser rojizas, amarillentas o azuladas. Estas últimas suelen ser las más masivas, motivo por el que viven durante poco tiempo: brillan tanto que su combustible nuclear se agota en apenas unos pocos millones de años. Cuando detectamos estrellas azules, estamos observando una región del cielo poblada de astros jóvenes y en la que se suceden nacimientos y muertes estelares. Se ha descubierto que, al considerar el conjunto de la luz proveniente de una galaxia, su color global tiende a ser o bien rojizo, o bien azulado. Las galaxias rojas suelen mostrar una geometría elíptica; las azules adoptan más bien una forma espiral. Entre estos dos grupos existe un tercero, considerado de transición, en el que la galaxia se halla en proceso de tornarse más rojiza debido a que sus jóvenes estrellas azules van muriendo, pero no son reemplazadas por otras. Con escaso sentido de la ironía, o por una cuestión de lógica cromática, los astrónomos han dado en apodar esta zona intermedia como «el valle verde».

Durante los últimos mil millones de años, las galaxias cuyos agujeros negros centrales han mostrado ciclos de trabajo más elevados han sido las espirales «verdes» de mayor tamaño. Estas albergan los agujeros negros gigantes que crecen y se muestran activos con más regularidad. Las estrellas que componen estas galaxias suman una masa que asciende a unos cien mil millones de veces la del Sol. Si miramos hacia una de ellas, la probabilidad de observar un agujero negro engullendo materia resultará mayor que en cualquier otra galaxia espiral. Una de cada diez contiene un agujero negro que consume materia de forma activa; en términos cósmicos, están deteniéndose y poniéndose en marcha de modo constante.

La conexión física entre el hecho de que una galaxia se encuentre en el valle verde y el comportamiento de su agujero negro central constituye un misterio. La mayoría de las galaxias son más rojizas o más azuladas. Una galaxia del valle verde se encuentra en pleno proceso de transformación; puede que incluso esté dejando de formar estrellas. Sabemos que los agujeros negros supermasivos pueden inducir ese efecto en otros entornos, como cúmulos de galaxias y grandes galaxias jóvenes, así que quizá sea su comportamiento lo que hace «más verdes» a las galaxias. Pero, por otro lado, también podría ser que las mismas circunstancias que están transformando la galaxia estuviesen alimentando al agujero negro.

De hecho, al estudiar otras galaxias espirales cercanas, se observa que los agujeros que expulsan más energía influyen sobre los sistemas circundantes en un entorno de miles de años luz. La intensa radiación X y ultravioleta emitida por la materia que cae hacia el agujero negro puede generar vientos de gas caliente que barren las regiones de formación estelar. No sabemos con certeza qué impacto ejerce esto en la producción de estrellas y elementos químicos, pero se trata en cualquier caso de una fuerza muy intensa. Por otro lado, el mecanismo detonante de esas violentas erupciones puede modificar su «capacidad de barrido». Si una galaxia enana se precipita hacia otra de mayor tamaño, el proceso agitará grandes cantidades de materia que acabará canalizándose hacia el agujero negro. Pero, al mismo tiempo, la gravedad y la presión de la galaxia enana entrante podrán amortiguar o reavivar la formación de estrellas en otras regiones. Quizás algunos de estos fenómenos, o tal vez todos, ayuden a explicar por qué la actividad de los agujeros negros supermasivos guarda tanta relación con la edad —y, por lo tanto, el color— de las estrellas que lo rodean.

Para su sorpresa, los astrónomos descubrieron hace poco que la Vía Láctea es una de las grandes galaxias del valle verde. Ello significa que nuestro agujero negro supermasivo debería encontrarse en un ciclo de trabajo rápido. Sin embargo, no parece tan activo. De hecho, solo se manifiesta por el efecto que ejerce sobre las órbitas de las estrellas cercanas al núcleo galáctico. De ello puede deducirse que su masa apenas asciende a unos cuatro millones de veces la del Sol: un alfeñique, comparado con otros. Pero, de acuerdo con nuestras observaciones del universo, debería ser uno de los más activos.

Parafraseando a Humphrey Bogart, de todos los lugares posibles de todas las galaxias del universo, teníamos que encontrarnos precisamente en este. Parece natural adoptar cierto escepticismo: no pensábamos que nuestra galaxia albergase un agujero negro supermasivo particularmente hambriento. Pero quizás ello no se deba sino a una coincidencia temporal, a la brevedad de nuestra vida en comparación con la del cosmos.

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros supermasivos, como el de cuatro millones de masas solares que ocupa el centro de nuestra galaxia, no solo son grandes consumidores. Mientras devoran la materia cercana, emiten también copiosas cantidades de energía.

Un agujero negro puede ejercer una influencia sorprendente sobre la galaxia que lo alberga. Una actividad muy escasa o demasiado intensa podría disminuir drásticamente el número de estrellas con las condiciones adecuadas para la vida.

La Vía Láctea posee unas características privilegiadas, con un agujero negro que parece activarse con la frecuencia adecuada para agitar lo justo el entorno y propiciar el nacimiento de sistemas planetarios semejantes al nuestro.

De hecho, parece que no hace tanto las cosas eran bastante diferentes. Hoy vemos el eco de rayos X devuelto por nubes de gas interestelar que se hallan a 300 años luz del centro galáctico. Por tanto, desde nuestra perspectiva, hace 300 años que algo grande y potente, emplazado en ese centro, estaba lanzando un millón de veces más rayos X que ahora. En 2010, un pequeño equipo de la Universidad Harvard anunció un descubrimiento más que notable: la existencia de una estructura difusa de tamaño descomunal, que emite rayos gamma y que parte del interior de nuestra galaxia. Esta presenta el aspecto de dos gigantescas burbujas, extendidas unos 25.000 años luz hacia arriba y hacia abajo a lo largo del eje perpendicular al plano galáctico. Ambas se encuentran ancladas en su base al centro de la Vía Láctea. Podrían ser el indicador de un episodio de crecimiento y actividad del agujero negro, el cual habría ocurrido durante los últimos 100.000 años.

En conjunto, las distintas pruebas nos proporcionan una idea bastante convincente de nuestro entorno. Si la Vía Láctea obedece las mismas reglas que hemos observado en decenas de miles de otras galaxias, entonces debe de contener un agujero negro que recibe alimento de forma muy regular. Puede que no sea el mayor o el más prolífico a la hora de generar energía al engullir materia, pero se trataría de un objeto activo, un abismo tormentoso en nuestro entorno. Una máquina gravitatoria que podría ponerse en marcha en cualquier momento.

RÁPIDO, PERO NO FURIOSO

Parece claro que la Vía Láctea y su agujero negro central pertenecen a un club bastante exclusivo. Ambos exhiben una condición especial en el universo presente, la cual apunta a una posible conexión entre el entorno cósmico y la existencia de la vida en la Tierra. Tanto científicos como filósofos discuten a menudo sobre «principios antrópicos», un término que hace referencia al ser humano o a su período de existencia. Los principios antrópicos tratan de responder a la difícil pregunta de si nuestro universo posee o no las características justas para que haya vida. El argumento se basa en el hecho de que, si algunas leyes físicas o unas pocas constantes fundamentales de la naturaleza hubiesen sido ligeramente diferentes, la vida en el universo jamás habría sido posible. Pero, hoy en día, carecemos de una explicación satisfactoria de por qué los parámetros físicos del universo son los que son, de manera que la pregunta sigue ahí. ¿Por qué nuestro universo resulta tan adecuado para la vida? ¿Acaso no se antoja como una condición harto improbable?

Al igual que a numerosos científicos, tales preguntas me resultan incómodas. Intentamos superar todo prejuicio que nos haga sentir «especiales» en cualquier sentido. Al igual que Copérnico propuso que la Tierra no se hallaba en el centro del sistema solar, tampoco nosotros nos encontramos en el centro del universo. Más aún, en el contexto de la cosmología moderna, carece por completo de sentido hablar de un «centro del universo». Sin embargo, no resulta sencillo replicar a algunos de los argumentos antrópicos. Una solución posible a la incomodidad que nos produce asignarnos un papel especial consiste en asumir una concepción de la naturaleza que permite múltiples realidades, o universos. Si el nuestro no fuese sino uno más entre muchos universos, pertenecientes a una versión multidimensional del espaciotiempo, nuestra existencia no supondría ninguna sorpresa: simplemente, nos hallaríamos en uno de aquellos universos en los que se dan las condiciones óptimas para la vida, una isla con el clima adecuado.

Todo lo anterior nos lleva a reflexionar con mayor detenimiento sobre la «lista de la compra» que el universo necesita para engendrar vida. Resulta verdaderamente curioso que la Vía Láctea coincida con una de esas galaxias privilegiadas en lo que a la actividad de su agujero negro supermasivo se refiere. Pero quizá no se trate de una mera coincidencia. La primera pregunta que nos viene a la mente es si nuestro sistema solar experimenta los efectos físicos directos de la actividad de un agujero negro que se encuentra a 25.000 años luz de distancia. En particular, ¿podría afectar a la capacidad de nuestro vecindario galáctico para albergar planetas con vida?

Cuando nuestro agujero negro central se activa, cuando engulle materia y bombea energía al exterior, no parece que desde nuestra posición podamos verlo brillar demasiado. Las enormes burbujas de rayos gamma que se extienden hacia el exterior del disco galáctico indican, sin duda, una gran producción de energía, pero no dirigida hacia nosotros. Si alguna vez ocurrieron sucesos de mayor calado, hubo de ser en un pasado más remoto aún, quizás incluso antes de que se formase nuestro sistema solar, hace 4500 millones de años. Desde entonces, parece probable que nuestro monstruo central solo haya ejercido un impacto modesto sobre las regiones galácticas más alejadas, como en la que nos encontramos nosotros.

El agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea podría activarse en cualquier momento

Esa circunstancia podría resultar favorable para la aparición de vida, ya que un incremento considerable de la radiación interestelar (fotones y partículas de muy alta energía) podría barrer un planeta como la Tierra. Dicha radiación ejercería efectos dañinos sobre las moléculas que componen los organismos y podría afectar incluso a la estructura y la química de la atmósfera y los océanos. A 25.000 años luz del centro de la galaxia quizá nos encontremos a salvo, pero todo podría ser muy distinto en caso de hallarnos más cerca. Tal vez no sea una coincidencia que no vivamos más próximos al núcleo galáctico, por lo que no deberíamos sorprendernos por vivir aquí y ahora, en vez de miles de millones de años antes o después.

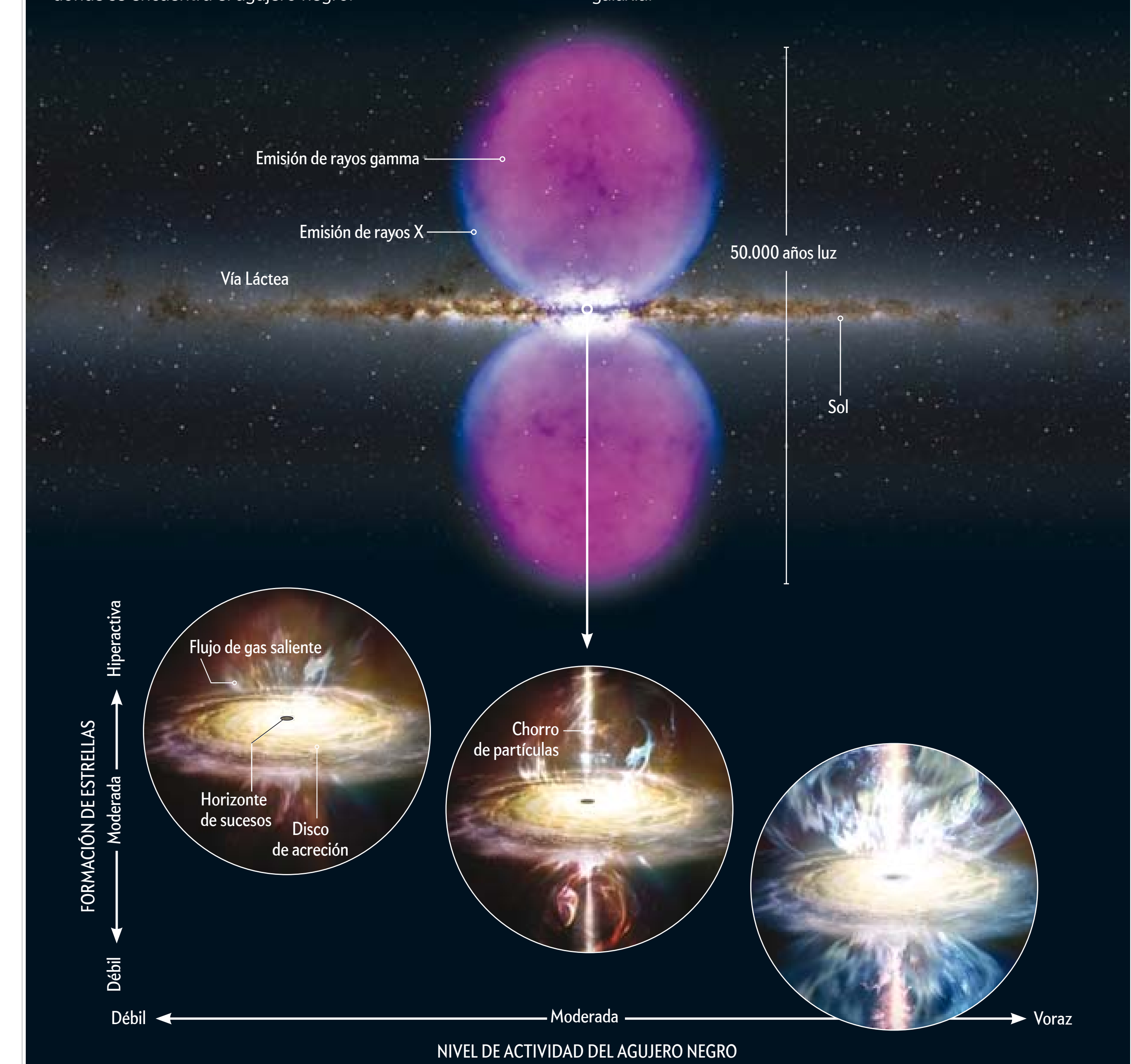
Nuestra galaxia, como tantas otras, ha evolucionado a la par que su agujero negro central. De hecho, las pistas que buscamos quizá respondan a ambas preguntas a la vez: cómo influye nuestro agujero negro supermasivo sobre la vida en la Tierra, y cuál es su papel como indicador general del estado actual de la galaxia. La conexión entre un agujero negro supermasivo y su galaxia nos proporciona una herramienta para calibrar la historia de esta. Los feroces cuásares del universo joven, alimentados por agujeros negros, suelen observarse en galaxias elípticas de gran tamaño, las cuales residen, por lo general, en el centro de los cúmulos galácticos. Tales galaxias se formaron temprano y con gran rapidez, por lo que hoy en día casi todas sus estrellas son viejas y el gas interestelar está demasiado caliente para formar nuevas estrellas o planetas.

Otras galaxias elípticas, cual enormes dientes de león estelares, parecen haberse formado con posterioridad a resultas de la fusión de otras galaxias. En el proceso, algo parece haber «en-

La influencia de un agujero negro

A escala galáctica, el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea puede considerarse una mota de polvo. Pero, con sus cuatro millones de masas solares, se trata de una mota muy pesada, que hace sentir sus efectos con cierta periodicidad. En 2010 se detectaron un par de descomunales «burbujas» de rayos gamma (*violeta*) extendidas a unos 25.000 años luz del centro galáctico, justo donde se encuentra el agujero negro.

Dichas burbujas podrían ser el residuo de algún proceso relativamente reciente en el que el agujero negro habría devorado grandes cantidades de materia. Al caer, esa materia habría emitido ingentes cantidades de radiación y partículas de alta energía. Quizá por suerte, la ola de energía que generó las burbujas no se dirigió hacia el sistema solar, situado en las afueras de la galaxia.



Ni demasiado caliente ni demasiado frío

La enorme cantidad de energía liberada cuando un agujero negro devora materia puede amortiguar los procesos de formación estelar. Un agujero negro demasiado activo (*derecha*) agitaría en exceso el entorno, lo cual impediría el nacimiento de nuevas estrellas y privaría a su galaxia de los elementos químicos pesados (como hierro, silicio u oxígeno, sintetizados en las estrellas) que forman nuestro planeta. Sin embargo, en ausencia de esa emisión reguladora (*izquierda*), una galaxia se encontraría repleta de estrellas jóvenes y muy masivas que, en poco tiempo, explotarían en forma de supernovas. El agujero negro de la Vía Láctea, con una actividad moderada (*centro*) consigue un equilibrio entre ambos extremos.

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER (*Vía Láctea y burbujas de rayos gamma*); RON MILLER (*insertos*)

friado» los procesos de formación estelar. La emisión de un agujero negro supermasivo —quizá no tan violenta, pero aún muy potente— constituye un candidato excelente para este papel regulador. Las galaxias espirales que poseen un bulbo central que sobresale a ambos lados del disco galáctico presentan también indicios de una relación íntima con su agujero negro central. Estas últimas siguen algunas de las pautas que caracterizan a las galaxias elípticas: en ambas, la masa del agujero negro central asciende a una milésima parte de la masa de las estrellas circundantes. Nuestra vecina Andrómeda pertenece a esta clase, con un gran bulbo que rodea a un agujero negro central más de veinte veces mayor que el nuestro.

Las siguientes en la lista son las galaxias sin bulbo, como numerosas espirales. Aunque la Vía Láctea es muy vasta, una de las mayores galaxias del universo conocido, alberga un agujero negro relativamente insignificante. La ausencia de bulbo supone un misterio: o bien la galaxia carecía en sus inicios de la materia prima suficiente para formarlo, o bien el agujero negro regulador nunca ha llegado a ponerse realmente en marcha, o bien a lo largo de su historia se han precipitado sobre ella menos galaxias pequeñas y menos cúmulos de materia que en otras. Las numerosas galaxias enanas también se quedan cortas con relación al agujero negro. Las más diminutas de todas constituyen objetos bastante insignificantes, de tan solo unas pocas decenas de millones de estrellas y sin apenas indicios de gas o polvo para crear otras nuevas. Aquellas ricas en material interestelar se muestran con frecuencia tan oscuras y carentes de estrellas que parecería que alguien hubiese olvidado encender la mecha.

En nuestra galaxia aún nacen estrellas con un ritmo de unas tres masas solares al año. Quizá no parezca excesivo en comparación con la vida de un ser humano, pero semejante tasa implica que, desde que nuestros ancestros comenzaron a andar erguidos en algún lugar de la garganta de Olduvai, en la actual Tanzania, en la Vía Láctea han nacido al menos diez millones de estrellas. Nada mal para un rincón de un universo que cuenta casi 14.000 millones de años de edad. Las galaxias gigantes del universo joven, que radian la brillante luz de sus cuásares, hace tiempo que se encuentran, en cierto modo, consumidas. Los aburridos eructos de sus agujeros negros centrales ahogan la formación de nuevos astros; las ondas de presión generadas por sus burbujas de materia, que se desplazan a casi la velocidad de la luz, impiden que el material se enfríe y condense en sistemas estelares. Mientras, la Vía Láctea continúa manos a la obra.

PERFECTO PARA LA VIDA

El hecho de que vivamos en una gran galaxia espiral con un bulbo central de poco tamaño nos indica qué tipo de galaxias son más adecuadas para la vida: aquellas que no han dedicado su pasado a alimentar colosales agujeros negros y que, por tanto, no han tenido que debatirse después contra las fuerzas liberadas en el proceso. En galaxias como la nuestra siguen formándose estrellas, pero con un vigor diferente del de otras. La mayoría de los nuevos astros nacen en los bordes de los brazos espirales, cuando el disco de gas y polvo se ve perturbado por ondas de presión. Además, las estrellas se están creando más lejos del centro galáctico de lo que solían. Los astrónomos dicen que vivimos en una región de formación estelar «modesta».

Una tasa de nacimiento estelar elevada agita mucho el entorno. En él surgen estrellas muy masivas que agotan su combustible con rapidez y que perecen en colosales explosiones de supernova, cuya radiación podría barrer o alterar con facilidad la atmósfera de cualquier planeta cercano. Los rayos gamma y las partículas más energéticas martillearían su superficie. En una implosión estelar, incluso los fantasmales neutrinos son liberados en tal abundancia que bastarían para dañar los organismos. Y estos no son sino los efectos más moderados. En caso de hallarse demasiado cerca de una supernova, un sistema planetario bien podría verse vaporizado por completo.

Y, sin embargo, esos son los mismos mecanismos que provocan que el interior de las estrellas, rico en elementos químicos, se esparza por el cosmos y dé lugar a otras estrellas y planetas: planetas con agua y complejas mezclas de hidrocarburos, estructurados por capas, dotados de una dinámica interna y agitados por el calor de radioisótopos pesados. Planetas con miles de millones de años de geofísica ante sí. Por tanto, entre las zonas de formación y explosión de estrellas jóvenes, y los asilos y cementerios de las más antiguas, existe una clase intermedia de entornos estelares a la cual pertenece nuestro sistema solar. Lo bastante alejado del centro de la galaxia, pero no demasiado cerca de las zonas agitadas y explosivas en las que hoy están naciendo nuevas estrellas.

La conexión entre el fenómeno de la vida y el tamaño y actividad de los agujeros negros supermasivos resulta bastante simple. Es más probable que surja una zona galáctica fértil y templada en una galaxia con un agujero negro no demasiado grande y que se activa solo de tanto en tanto, que en una con un monstruo voraz. La existencia de galaxias como la Vía Láctea en este momento cósmico se encuentra íntimamente relacionada con los fenómenos opuestos de aglomeración gravitatoria de materia y generación explosiva de energía disruptiva por parte de los agujeros negros. Una actividad demasiado intensa por parte de estos últimos conllevaría una formación escasa de nuevas estrellas, por lo que la producción de elementos químicos pesados cesaría. Un agujero negro casi inerte provocaría un entorno o bien repleto de estrellas jóvenes que explotan muy pronto, o bien demasiado calmo como para engendrar nada. Cualquier desequilibrio entre estos extremos alteraría la ruta de formación de estrellas y galaxias.

La cadena de sucesos que nos ha traído hasta aquí sería diferente —o no existiría— sin la coevolución de galaxias y agujeros negros supermasivos, con su extraordinaria función reguladora. El número total de estrellas en el universo sería otro, y también la proporción entre estrellas masivas y ligeras. Las galaxias exhibirían probablemente geometrías muy distintas, así como otra distribución de gas, polvo y elementos químicos. Algunos lugares nunca habrían sido abrasados por la intensa radiación de sincrotrón de un agujero negro supermasivo, mientras que otros jamás habrían recibido la sacudida necesaria para desencadenar la formación de estrellas y planetas.

La fértil esquina del cosmos en la que vivimos es el resultado de todo lo que ha ocurrido en sus inmediaciones, incluida la actividad del agujero negro central de la Vía Láctea. Los mismos objetos que se han sellado para siempre del resto del universo han servido también como una de las fuerzas que más han contribuido a conformarlo. Les debemos mucho.

PARA SABER MÁS

Agujeros negros supermasivos. José Luis López Fernández y Wolfgang Steffen en *Investigación y Ciencia* n.º 396, septiembre de 2009.

Agujeros negros de masa intermedia. Jenny E. Greene en *Investigación y Ciencia* n.º 426, marzo de 2012.

Life, unbounded. Blog del autor en **blogs.scientificamerican.com/life-unbounded**

AGRICULTURA

Gestión ecológica de los suelos agrícolas

Las estrategias que mejoran la función biológica del suelo contribuyen a maximizar los servicios ambientales de los cultivos y a mantener su productividad a largo plazo

Joan Romanyà Socoró



EN SÍNTESIS

La agricultura ecológica, que se sirve de los recursos locales y del trabajo artesanal, potencia los procesos naturales para promover la producción de alimentos de calidad.

La mejora de la calidad del suelo y el reciclaje de los nutrientes esenciales para los cultivos en el sistema suelo-planta constituye la base de este modelo de gestión, que intenta sostener la productividad agrícola a largo plazo mediante estrategias que favorezcan la estructuración y la función biológica del suelo.

Asimismo, la agricultura ecológica ejerce un impacto ambiental reducido y contribuye a la mitigación del cambio climático y a la lucha contra la desertización.



Joan Romanyà, especialista en materia orgánica y reciclaje de nutrientes en suelos forestales y agrícolas, es profesor de edafología en la Universidad de Barcelona. Su investigación actual se centra en el estudio de los procesos biológicos del suelo y sus implicaciones en la agricultura y la gestión del territorio.

El suelo representa un recurso esencial en agricultura. Lejos de ser una capa residual y estática, un mero soporte para las plantas, constituye un ecosistema complejo y dinámico donde tienen lugar numerosos procesos físicos, químicos y biológicos. De ellos dependen la fertilidad y la estructura del suelo y, en última instancia, la productividad de los cultivos.

Debido al empleo de abonos inorgánicos y plaguicidas, la agricultura intensiva ha aumentado de modo notable el rendimiento de las cosechas. Sin embargo, también ha generado numerosos problemas ambientales. En las últimas décadas, como resultado de la intensificación agrícola y del cambio climático, muchos suelos de labranza han sufrido pérdidas destacables de materia orgánica, lo que ha dado lugar a una menor capacidad agronómica o a un mayor riesgo de desertización. Por ello, se hace necesaria la búsqueda de nuevas técnicas que incrementen el contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas.

La gestión ecológica intenta sostener la productividad agrícola a largo plazo mediante el uso de técnicas blandas y recursos locales que favorezcan la función biológica del suelo. La estructura del suelo constituye la clave para su buen funcionamiento, ya que define el hábitat para los organismos edáficos y, además, promueve el flujo de agua y nutrientes hacia las plantas.

Existen varias estrategias para lograr tal fin: la incorporación de los residuos de cosecha para promover el reciclaje interno de nutrientes entre suelo y planta, la aplicación de diferentes fertilizantes orgánicos sobre todo de origen local, bien sean frescos

La agricultura ecológica genera paisajes diversos, con parcelas de tamaño reducido que se adaptan a la topografía del terreno. Las plantas acompañantes de esta viña en Ciutadilla (Lérida), principalmente malas hierbas, protegen la estructura del suelo superficial y favorecen su funcionamiento hídrico.

o compostados, la diversificación de los cultivos a base de rotaciones y policultivos, y la introducción de plantas que fijan el nitrógeno atmosférico.

En el presente artículo examinamos los parámetros edáficos esenciales que determinan la productividad de los cultivos, con especial referencia a la estructura del suelo y a los nutrientes principales para las plantas. Abordamos la forma de mantener o mejorar estas propiedades mediante las prácticas que propone el cultivo ecológico.

HACIA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

La agricultura ecológica pretende ser una alternativa sostenible a los sistemas agrícolas intensivos. En ella se excluye el uso de abonos sintéticos y plaguicidas, a la vez que se intenta mantener la producción agronómica e incrementar la fertilidad del suelo a largo plazo. Se basa en la optimización de los recursos locales y, por tanto, tiende a ser independiente de los procesos industriales, como la producción de abonos inorgánicos, la fabricación de productos fitosanitarios y la creación de semillas transgénicas o comerciales de uso amplio. Además, su práctica conlleva una reducción del consumo de combustibles fósiles y un aumento de las labores manuales, lo que contribuye al desarrollo de las zonas rurales.

La gestión ecológica no solo afecta a las técnicas agronómicas dentro de un campo de cultivo. También influye en la diversidad del paisaje y los cultivos, el tamaño de los campos y la vegetación de los márgenes (sotos y linderos). De ahí que la reconversión ecológica exija una adaptación profunda que abarca aspectos agronómicos pero también socioeconómicos. Por un lado, conlleva el uso de cierto tipo de aperos y maquinaria agrícola de tamaño reducido, que ejercen un menor impacto sobre el suelo y que a menudo se centran en el tratamiento de las plantas acompañantes de los cultivos. Cabe destacar las segadoras o gradas de púas o de discos para el desherbado, o los arados cincel (*chisel*), que no invierten las capas del suelo.

Por otra parte, desde un punto de vista social, la agricultura ecológica favorece la mano de obra especializada, ya que su práctica requiere un conocimiento detallado de los procesos biológicos asociados a la producción de cultivos, así como de las necesidades específicas para el contexto agronómico, climático y ambiental de la zona de trabajo. Además, los trabajos a pequeña escala, primordiales en la gestión ecológica, ponen de manifiesto las ventajas del trabajo manual.

Asimismo, se intenta que las prácticas agrícolas se hallen integradas en el medio físico, como sucedía en la mayoría de los paisajes tradicionales que trataban de optimizar los procesos agronómicos. En este sentido, la recuperación de antiguas técnicas agronómicas y patrones de ocupación del territorio puede resultar básica.

En un estudio llevado a cabo por la Universidad de Michigan se ha visto que las explotaciones agrícolas con una gran diversidad de cultivos y con un tamaño de parcela reducido pueden producir en conjunto más que los monocultivos a gran escala. Sin embargo, en muchos casos la producción ecológica todavía no llega a los niveles de productividad de la agricultura convencional, como han comprobado Verena Seufert, de la Universidad McGill en Canadá, y sus colaboradores en un metanálisis recién publicado en *Nature*. Ello sucede cuando los cul-



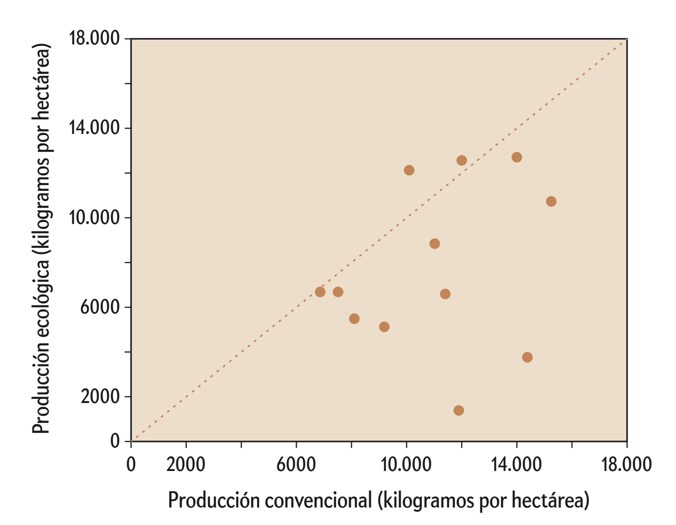


La vertedera, un arado que consta de palas cóncavas (*a*), causa una perturbación importante del suelo al voltear y extender la tierra levantada (*b*). En agricultura ecológica se recomienda el uso del arado cincel, construido con púas cinceladas (*c*). Al rasgar la tierra sin levantarla ni invertirla, altera menos la estructura edáfica (*d*); además, conlleva un menor gasto energético. (Fotos obtenidas en la Finca «El Encín», del Instituto Madrileño de Investigaciones Agrarias y Alimentarias.)





TODAS LAS FOTOGRAFÍAS SON CORTESÍA DEL AUTOR



La producción de cereales en agricultura ecológica es generalmente menor que en agricultura convencional. Sin embargo en algunos casos se obtienen productividades parecidas.

DATOS OBTENIDOS DE «CARBON AND NITROGEN STOCKS AND NITROGEN MINERALIZATION IN ORGANICALLY MANAGED SOILS AMENDED WITH COMPOSTED MANURES», JOAN ROMANYÀ ET AL. EN *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY* N.º 41, PÁGS. 1337-1347, 2012

tivos ecológicos se adaptan a los patrones de paisaje generados por la agricultura industrial, es decir, en fincas de gran tamaño y con una diversidad reducida de las plantas cultivadas y de las acompañantes.

Por otro lado, los estudios sobre la reposición de la fertilidad en sistemas agrícolas tradicionales han puesto de manifiesto que las técnicas de fertilización del suelo utilizadas en el pasado no habrían bastado para hacer frente al incremento de demanda de alimentos asociado al crecimiento demográfico exponencial que tuvo lugar en el mundo desde finales del siglo XIX y durante el siglo XX. Por ello, la gestión ecológica no debe limitarse a la recuperación de técnicas antiguas, sino que debe conjugarlas con una optimización de la producción agronómica a través del conocimiento científico moderno sobre la gestión de la biodiversidad vegetal y edáfica, y sobre la calidad del suelo. A este respecto hay que considerar el papel esencial que desempeña el reciclaje de materia orgánica y nutrientes en el sistema suelo-cultivo.

MATERIA ORGÁNICA Y CALIDAD DEL SUELO

La materia orgánica constituye una reserva de nutrientes para las plantas y los organismos del suelo y, por otra parte, favorece la estructuración. Una buena estructura resulta fundamental no solo para la constitución del hábitat edáfico, sino también para la retención y suministro de agua para las plantas, así como para los procesos biológicos del suelo y el reciclaje de nutrientes. Además, la materia orgánica favorece la biodiversidad edáfica, y su interacción con los organismos del suelo contribuye a la supresión de plagas y ejerce efectos hormonales que estimulan la producción vegetal.

Por debajo de cierto valor umbral de materia orgánica, el rendimiento de los cultivos disminuye de manera importante incluso después de realizar un aporte de abonos minerales. Tal hecho se relaciona con la degradación de la estructura física provocada por su empobrecimiento en materia orgánica.

La estructura física del suelo viene definida por el modo en que se agregan las partículas sólidas que lo componen. Los agregados de tamaño reducido (microagregados), que generan la microestructura del suelo, dependen sobre todo de la granulometría (la proporción relativa de partículas minerales de distintos tamaños: arenas, limos y arcillas) y son muy estables en el tiempo. Por el contrario, los agregados de mayor tamaño (meso- y macroagregados), determinan la macroestructura y dependen de la dinámica de la materia orgánica, por lo que su estabilidad varía a lo largo del tiempo y pueden favorecerse mediante estrategias que aumenten el contenido orgánico. La macroestructura se sostiene gracias a los cementos orgánicos generados por la actividad microbiana, principalmente de hongos, bacterias y actinomicetos. La actividad microbiana se ve favorecida, a su vez, por la materia orgánica fresca de los restos vegetales o los exudados de las raíces. Además, el crecimiento de estas y el tránsito de la fauna del suelo generan espacios y canales, y contribuyen a la formación de la macroestructura.

La estabilidad de los macroagregados guarda una relación directa con la forma y estabilidad de los terrones del suelo. Por ello, la observación del estado y forma de los terrones sirve de base para el diagnóstico de la calidad de los suelos de labranza. Los terrones más redondeados, sin aristas, indicarían una buena estructura y una reserva adecuada de materia orgánica.

En la península ibérica, los niveles de materia orgánica más bajos se dan en los suelos de labranza de las zonas más secas de clima mediterráneo y árido, sobre todo en cultivos herbáceos, viñas y cultivos arbóreos de secano. Por consiguiente, el territorio agrícola de secano resulta el más expuesto a los procesos de degradación edáfica. En esas condiciones conviene gestionar el suelo para aumentar su nivel de materia orgánica, no solo para la recuperación de su capacidad agronómica, sino también para luchar contra la erosión y la degradación del territorio.

Cuando el suelo se ve desprovisto de plantas, o los aportes orgánicos resultan escasos o inexistentes, la estabilidad de los agregados disminuye. Al desmoronarse estos, los suelos pierden porosidad y, en consecuencia, parte de su funcionalidad. Para favorecer su reestructuración, en primer lugar, deben restablecerse las entradas de materia orgánica, ya sea a partir de los exudados o descomposición de las raíces, o bien mediante el aporte de residuos de cosecha o de materia orgánica exógena. En segundo lugar, una vez recuperados los cementos orgánicos, se necesitan agentes que reagreguen las partículas de suelo, como el crecimiento de las raíces o la actividad de las lombrices y otra fauna del suelo.

La recuperación de la porosidad asociada a la reagregación del suelo constituye un proceso más lento que la recuperación de los cementos orgánicos y la estabilidad estructural. En un trabajo reciente publicado por la Universidad de Barcelona se ha planteado la hipótesis de que, en suelos de labranza muy empobrecidos en materia orgánica, la reestructuración edáfica se ve mermada por la presencia en el suelo de carbonato cálcico. Este puede actuar a manera de cemento que dificulte la disgregación de las partículas necesaria para la reestructuración. En la recuperación de la estructura de estos suelos debería considerarse por tanto la disminución de la concentración de carbonatos como un requisito previo. En nuestros estudios hemos visto que las enmiendas orgánicas pueden contribuir a reducirla; en cambio, la menor intensidad del arado no resulta efectiva en este sentido.

Por último, cabe destacar la función que ejercen la materia orgánica en la superficie del suelo y el recubrimiento vegetal. Los aportes orgánicos sobre el suelo en forma de acolchado (*mulching*) y la cobertura que ofrecen las plantas protegen los agregados superficiales del impacto de las gotas de lluvia y fa-

vorecen su estabilidad y longevidad. La estructura de la superficie edáfica resulta de especial relevancia porque determina la tasa de infiltración del agua y, en consecuencia, la escorrentía. Una buena infiltración supone un doble beneficio para el suelo, al reducir la erosión y favorecer la retención de agua.

APLICACIÓN DE ENMIENDAS ORGÁNICAS

La aplicación de materia orgánica en los campos de cultivo es una práctica muy antigua que contribuye al mantenimiento o a la mejora de la capacidad agronómica y ambiental de los suelos agrícolas. A partir de la Segunda Guerra Mundial y hasta la actualidad, a causa del uso hegemónico de los abonos minerales, las enmiendas orgánicas han quedado relegadas a un segundo término. En consecuencia, en los últimos decenios han escaseado los estudios sobre la repercusión de esa práctica.

Aunque las enmiendas aportan al suelo la materia orgánica y los nutrientes necesarios para el crecimiento vegetal, su empleo no siempre favorece la acumulación y reserva de tales compuestos en el suelo. El comportamiento de las enmiendas resulta muy distinto según la calidad del material aplicado, la cual depende de varios aspectos. Uno de ellos corresponde al contenido en sustancias contaminantes que pueden causar desajustes en el funcionamiento del sistema suelo-planta. Para obtener productos de buena calidad conviene mantener los compuestos potencialmente contaminantes separados de las fuentes de materia orgánica aprovechables en agricultura. En el caso de utilizar residuos urbanos, se deberían separar en origen los materiales orgánicos de origen natural (sobre todo, residuos de alimentos) de otros productos de origen industrial (detergentes, envoltorios, pilas, etcétera). Si se emplean residuos procedentes de la ganadería, conviene evitar también la contaminación asociada al proceso industrial que conlleva la ganadería intensiva (medicamentos, plaguicidas u otros productos biocidas, así como detergentes y residuos de las instalaciones de limpieza). Por ello, en agricultura ecológica se prohíbe el uso de los residuos orgánicos urbanos que no se hayan fraccionado en origen o los procedentes de la ganadería intensiva.

Otro aspecto de la calidad de la enmienda orgánica hace referencia a las características propias del material empleado. Teniendo en cuenta que los residuos orgánicos constituyen la base de la red trófica de los organismos del suelo, la calidad intrínseca del material orgánico depende de dos factores principales: la biodegradabilidad, relacionada con la estabilidad de las moléculas que lo componen, y el equilibrio existente entre sus principales elementos, sobre todo entre el carbono y el nitrógeno (aspecto que analizaremos más adelante).

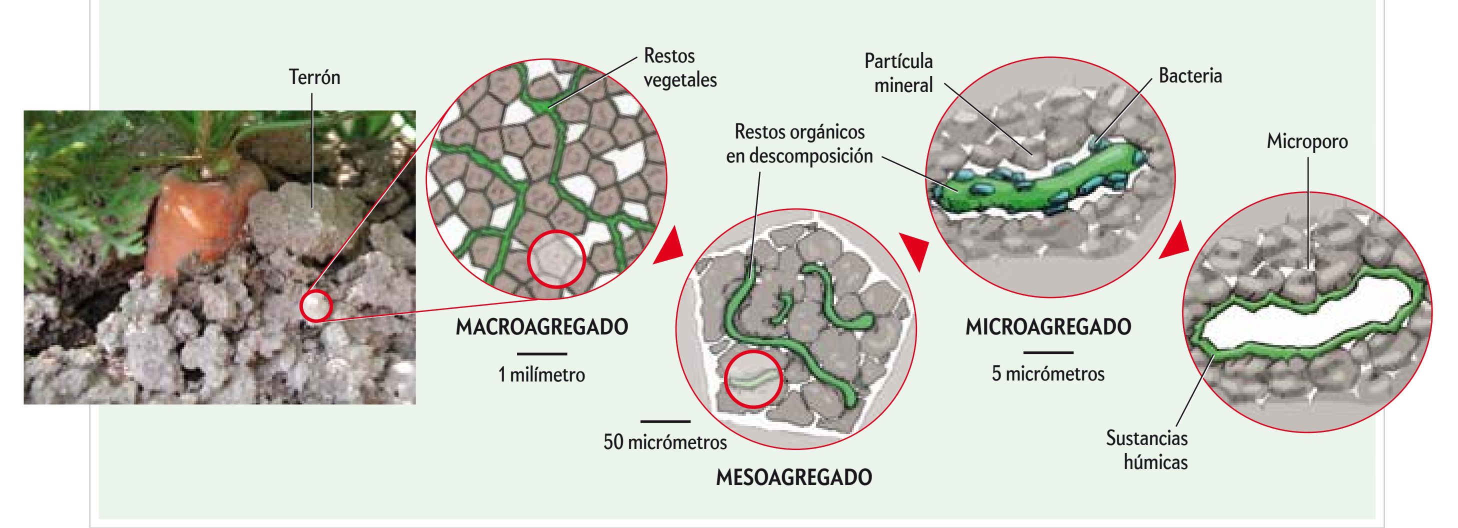
La materia orgánica añadida al suelo sufre un proceso de descomposición que será más rápido cuanto mayor sea su grado de biodegradabilidad. Los materiales orgánicos frescos (restos de la cosecha, estiércol) son poco estables, presentan moléculas fácilmente biodegradables y suelen asociarse a una actividad biológica elevada por parte de los organismos edáficos que se aprovechan de ellos. Por el contrario, a los materiales estabilizados, como el compost, les quedan pocas moléculas orgánicas fácilmente biodegradables y, por tanto, se relacionan con una actividad biológica más moderada.

Cuando se fabrica el compost, la materia orgánica fresca sufre una descomposición muy acelerada. Esta se ve favorecida

ESTRUCTURA Y FERTILIDAD

Suelo estructurado, suelo sano

La estructura física del suelo constituye un parámetro fundamental en la gestión ecológica de los cultivos. Una buena estructuración favorece la retención y suministro de agua para las plantas, así como el reciclaje de materia orgánica y nutrientes. Si obtuviéramos una imagen aumentada de un terrón de tierra, veríamos que las partículas edáficas (minerales y orgánicas) se agrupan a diferentes escalas, formando macroagregados, mesoagregados y microagregados. Los macroagregados definen el hábitat para el crecimiento de las raíces y el tránsito de la fauna del suelo. Los mesoagregados correponden a las estructuras de tamaño intermedio. Los microagregados constan de partículas minerales asociadas con bacterias y restos orgánicos en descomposición. Con el tiempo, estos restos se convierten en sustancias húmicas que, junto con las fuerzas de atracción entre las partículas minerales más finas (arcillas), estabilizan los agregados (operan a modo de cemento orgánico). Asimismo, crean huecos (microporos) que confieren aireación al suelo.





Los cultivos arbóreos de secano, así como muchos suelos de viña, carecen la mayor parte del tiempo de cubierta vegetal. La entrada natural de materia orgánica en estos suelos es mínima y sus niveles de materia orgánica se hallan entre los más bajos. En la imagen, viña de La Torre de Claramunt (Barcelona).



La técnica del acolchado, que en este cultivo arbóreo de La Fortesa (Barcelona) se ha aplicado mediante la cobertura del suelo con residuos de poda triturados, incrementa la capacidad de infiltración de agua en el suelo y disminuye el riesgo de erosión. A medio plazo, contribuye también al reciclaje de nutrientes.

por una buena aireación y por una temperatura elevada, de hasta 70 ºC, que se produce en las pilas de compostaje. A lo largo del proceso, la estructura y la composición química de la materia orgánica experimentan una serie de cambios que dan lugar a un material mucho más estable y rico en nutrientes.

La biodegradabilidad o estabilidad de la materia orgánica se mide a partir del coeficiente isohúmico, que representa la proporción de materia orgánica resistente a un ataque con ácido fuerte (como el ácido sulfúrico). Cuanto mayor sea este coeficiente, más estable resultará la materia orgánica en cuestión. De modo simplificado, se considera que la proporción de la enmienda orgánica que permanecerá de modo duradero en el suelo se corresponde con el coeficiente isohúmico. Se espera, por tanto, que la aplicación de residuos estables aumente más la reserva de materia orgánica del suelo que la aplicación de residuos biodegradables.

Sin embargo, la realidad es más compleja y hay otros factores que se deben tener en cuenta, como el clima y la respuesta de las comunidades microbianas a las enmiendas. Mientras que el aporte de restos orgánicos frescos se asocia a un crecimiento acelerado de la población microbiana y de su actividad, la aplicación de materiales estables ejerce un efecto moderado o casi nulo.

En ciertas ocasiones, las enmiendas no producen el aumento deseado de la reserva orgánica del suelo, en especial cuando el material añadido es muy biodegradable y rico en nutrientes. El fenómeno se conoce como efecto cebador de la actividad microbiana. Se produce cuando la rápida proliferación de microorganismos en respuesta a una entrada de productos frescos favorece no solo la descomposición de los productos más biodegradables, sino también la de los constituyentes más estables de la reserva del suelo que, en condiciones de menor actividad microbiana, no se verían afectados. El efecto cebador puede minar la reserva de materia orgánica estable del suelo.

Por el contrario, las enmiendas con productos estables tendrán efectos más moderados en la biología edáfica que redundarán en la acreción de la reserva orgánica. En este último caso, un mayor porcentaje de la materia orgánica añadida permanecerá en el suelo de modo duradero. Además, este porcentaje se sumará a la reserva orgánica ya existente en el suelo.

RECICLAJE DE NUTRIENTES

La agricultura convencional considera necesario aportar al suelo las cantidades de nutrientes necesarias para lograr un buen desarrollo del cultivo. Tiene poco en cuenta el reciclaje de nutrientes en el sistema suelo-planta y en ningún caso espera que la reserva del suelo llegue a suministrar la mayoría de los que el cultivo exige. Por tanto, en este modelo de explotación, la aplicación de nutrientes en forma de abonos inorgánicos reviste una enorme importancia. Se realiza con una periodicidad de varias veces al año, en especial, antes de la siembra (abonado de fondo) y antes del estadio de máximo crecimiento del cultivo (abonado en cobertera).

En contraposición, la gestión de la fertilidad en los sistemas agrícolas ecológicos se basa en maximizar el reciclaje de nutrientes en el sistema suelo-cultivo y en minimizar la aplicación de abonos. Las enmiendas orgánicas no suelen realizarse anualmente, sino en períodos de tiempo más prolongados. La finalidad de tal fertilización es construir una reserva de nutrientes para que, a través de la mineralización y la movilización (procesos químicos y biológicos que se producen en el suelo), se pueda abastecer la demanda del cultivo. Como veremos a continuación, el reciclaje de los principales elementos utilizados por los vegetales, el nitrógeno y el fósforo, se dan por mecanismos muy distintos. Mientras que el nitrógeno se vuelve disponible para las plantas sobre todo mediante procesos de mineralización, el fósforo lo hace a través de la movilización (desorción y solubilización).

NITRÓGENO

El nitrógeno contenido en las enmiendas orgánicas se presenta mayoritariamente en forma de compuestos orgánicos de diversa índole, mientras que el nitrógeno mineral (nitratos, amonio) constituye una menor proporción, menos del 30 por

ciento del nitrógeno total. En los materiales compostados, las formas inorgánicas aún resultan inferiores; pueden situarse por debajo del 10 por ciento.

Teniendo en cuenta que las plantas absorben los nutrientes en su forma mineral, podemos afirmar que la mineralización del nitrógeno resulta fundamental para el suministro de ese elemento. Se trata de un proceso microbiano por el que el nitrógeno asociado a la materia orgánica se libera al medio. Por otro lado, la incorporación de nitrógeno mineral a la materia orgánica del suelo (por ejemplo, cuando entra a formar parte de los microorganismos edáficos o se añade a moléculas orgánicas preexistentes) se denomina inmovilización.

La actividad microbiana puede mineralizar o inmovilizar nitrógeno en función de las características del sustrato orgánico. El cociente entre el carbono y el nitrógeno (C/N) del sustrato indica su riqueza en nitrógeno. En medios pobres, con una relación C/N elevada (por encima de 18 o 20), la actividad microbiana inmoviliza nitrógeno; en medios más ricos, con una relación C/N baja (por debajo de 15), lo mineraliza.



La fijación simbiótica de nitrógeno **se da en los nódulos que se forman en las raíces de las leguminosas. Dichos nódulos contienen un bacterioide del género *Rhizobium*. Este capta el nitrógeno de la atmósfera, del que se nutre la planta. (En la imagen, nódulos de garbanzo.)**

En la mayoría de los casos, a medida que avanza la descomposición, la relación C/N disminuye, por lo que este índice puede utilizarse también como un indicador del grado de descomposición del sustrato orgánico en cuestión. Los materiales compostados que se añaden al suelo suelen presentar una relación C/N ligeramente por encima de 10. En estas condiciones, a pesar de que el nitrógeno se halle en formas más estables que en estiércoles frescos, sería de esperar una mineralización neta moderada del nutriente justo después de la enmienda. Por el contrario, los estiércoles frescos o residuos vegetales con relaciones C/N más elevadas pueden producir una inmovilización neta de nitrógeno durante las primeras semanas, por lo que podrían generar un déficit del nutriente para las plantas, aunque sin duda más tarde se volverá a mineralizar.

FÓSFORO

A diferencia del nitrógeno, la mayor parte del fósforo contenido en los abonos orgánicos es mineral, esto es, más de un 70 por ciento del elemento se presenta en forma de anión ortofosfato. De ahí que la aplicación de enmiendas orgánicas represente una entrada de fósforo directamente disponible para los cultivos.

Diversos estudios llevados a cabo en el ámbito de la agricultura convencional muestran que la aplicación de fósforo en forma mineral, ya sea como superfosfato (no permitido en agricultura ecológica) o roca fosfatada, resulta mucho menos eficiente que cuando tales abonos se mezclan con materiales orgánicos. Para entender este hecho cabe destacar que, a diferencia del nitrógeno, el fósforo mineral es muy insoluble y suele quedar atrapado en las partículas minerales del suelo. Mediante procesos de adsorción o precipitación, las moléculas que contienen fósforo establecen enlaces con el hierro y el aluminio (sobre todo en los suelos ácidos) o con el calcio (en suelos básicos) y se forman compuestos muy insolubles que las plantas no pueden utilizar.

Existen varios mecanismos químicos de movilización del fósforo retenido en el medio edáfico, en buena parte mediados por la materia orgánica del suelo y por procesos biológicos asociados a la actividad de los microbios y de las raíces. La movilización tiene lugar a partir de reacciones en las que ciertas moléculas del tipo ácidos orgánicos (ácido cítrico o ácido oxálico) segregadas por las raíces o los microbios del suelo secuestran el hierro, el aluminio o el calcio de los compuestos insolubles de fósforo y liberan así el nutriente. Por otra parte, las moléculas orgánicas ocupan los sitios libres del suelo que de otro modo llenaría el fósforo. Por tanto, su presencia evita que el nutriente precipite, con lo que aumenta su solubilidad y disponibilidad para las plantas.

Los microorganismos del suelo actúan también como acumuladores de fósforo y constituyen otra reserva importante del nutriente. Si bien tal fracción representa una pequeña proporción de todo el fósforo edáfico, su enorme dinamismo hace de su cuantificación una medida importante cuando se desea conocer su disponibilidad para las plantas. Además, los microorganismos incorporan el ion ortofosfato (forma química mayoritaria en los abonos) a la materia orgánica del suelo mediante enlaces de tipo éster y diéster.

Se ha visto que si bien la forma del abonado de fósforo afecta a su disponibilidad inmediata (tal como se ha mencionado más arriba), ello no influye en la construcción de su reserva. El fósforo orgánico del suelo se mineraliza y contribuye a la nutrición de los cultivos. Los microorganismos y las raíces de las plantas regulan esa mineralización según sus necesidades y como respuesta a la disponibilidad de la forma inorgánica. En suelos con niveles bajos de fósforo mineral soluble, la reserva de fósforo orgánico se reducirá, mientras que en suelos con niveles elevados aumentará.

Cabe destacar que la mineralización del fósforo se halla desacoplada de la mineralización del nitrógeno. Mientras que la del primero se produce sobre todo según los requisitos de los organismos edáficos (microbios y raíces), la del segundo depende en gran parte de la calidad de las moléculas orgánicas implicadas, por lo que tiene lugar con mayor independencia respecto a la demanda biológica.



El nitrógeno procedente del cultivo de leguminosas del año anterior favorece la nutrición del cultivo posterior. El campo de cebada (*Hordeum vulgare*) de la imagen, en Montblanquet (Lérida), presenta un verde más intenso en la parte del campo donde se cultivó guisante (*Pisum sativum*) el año anterior.

BALANCE DE NUTRIENTES

Los abonos orgánicos (estiércoles y compost) suelen poseer una riqueza en fósforo relativa al nitrógeno superior a los cultivos, es decir, presentan una menor relación N/P. Por ese motivo, las enmiendas orgánicas que se aplican con el criterio de abastecer el nitrógeno necesario para el cultivo anual pueden conllevar un exceso de fósforo en el suelo. De ahí que en agricultura ecológica se apliquen cantidades de abonos orgánicos ajustadas a la demanda de fósforo de las plantas, aunque ello impida satisfacer su requisito anual de nitrógeno. A largo plazo conviene por tanto suplir la deficiencia de nitrógeno mediante la introducción de cultivos de leguminosas en las rotaciones. Se trata de un grupo de plantas, entre las que figuran el garbanzo, la lenteja, la judía o el guisante, que aportan nitrógeno a los cultivos gracias a la simbiosis que establecen sus raíces con ciertos microorganismos que fijan el nitrógeno molecular (N_2) de la atmósfera.

El uso de leguminosas o de otras plantas fijadoras de nitrógeno resulta crucial para el desarrollo de sistemas agrícolas ecológicos, sostenibles y eficientes. Representa una entrada destacable del nutriente al sistema suelo-cultivo, ya que las plantas lo extraen del aire, por lo que disminuye la necesidad de aportarlo en el abonado. Tales vegetales suelen ser más ricos en proteínas, si bien para su buen desarrollo necesitan una disponibilidad adecuada de agua y otros nutrientes, en especial de fósforo.

Algunos estudios han demostrado que las leguminosas dejan bajo tierra una buena parte del nitrógeno fijado. La proporción que se destina a la parte subterránea de la planta puede incluso superar a la que se acumula en la parte aérea. Además, el nutriente puede ser exudado al medio por las raíces mediante rizodeposición, o ser transferido a otras plantas cercanas a través de las hifas de las micorrizas (hongos que establecen simbiosis con las raíces y que aumentan la superficie radicular). La exudación de nitrógeno en la rizosfera puede resultar muy relevante para el enriquecimiento de nitrógeno del suelo y beneficiar a los cultivos posteriores.

Por otro lado, el uso de las leguminosas en la rotación de cultivos ejerce un efecto sobre la reserva de materia orgánica y de nitrógeno del suelo. Las leguminosas cultivadas liberan a través de las raíces compuestos orgánicos lábiles y ricos en nitrógeno, lo que favorece la actividad microbiana del suelo y el reciclaje de nutrientes. Tal efecto, si se acopla con la demanda nutricional de los cultivos, estimula el crecimiento de estos, lo que a su vez contribuirá a aumentar el aporte de materia orgánica en el suelo. No obstante, cabe destacar que el aumento observado de materia orgánica por el cultivo de leguminosas es muy inferior al que resulta de aplicar estiércol.

Las leguminosas pueden constituir el cultivo principal, ya sea para la producción de grano o de forrajes, o formar parte de un policultivo o de un abono verde. Este último representa una forma importante para mejorar la fertilidad del suelo en agricultura ecológica. Se trata de plantas que se siembran junto a los cultivos y que no se cosechan, sino que se siegan y se incorporan al suelo mediante gradas, generalmente antes de que florezcan. El abono verde favorece así el reciclado de los nutrientes contenidos en la parte aérea de las plantas, ya que antes de la floración el material vegetal es más lábil y rico en nutrientes. Cualquier planta puede cultivarse como un abono verde, aunque algunas especies, como el trébol, la mielga o la oruga silvestre, resultan mejores que otras. También pueden emplearse mezclas de varias especies, entre ellas, plantas arvenses (malas hierbas). A excepción de las plantas fijadoras de nitrógeno (básicamente, del grupo de las leguminosas), los abonos verdes no suponen un aporte externo de nutrientes al sistema, sino que conllevan una mera movilización de estos. El principal objetivo de los abonos verdes consiste, pues, en promover la biología y la estructura del suelo y, en consecuencia, el reciclaje de nutrientes.

En conclusión, la gestión ecológica favorece el reciclaje de nutrientes y la sanidad de los cultivos gracias a la mejora de las condiciones del suelo y al aumento de la complejidad del agroecosistema. En este contexto, las investigaciones sobre los procesos biológicos implicados y sobre las técnicas de reciclaje de residuos orgánicos de calidad (incluidos los métodos de compostaje) desempeñan un papel clave. El enfoque planteado deriva en un sistema de explotación más artesano y centrado en las condiciones locales. El reto se halla en la adaptación de este modelo a la demanda creciente de alimentos de calidad prevista para las próximas décadas. Su éxito dependerá sin duda de la disponibilidad de mano de obra cualificada y de la capacidad de organizarse a escala local.

PARA SABER MÁS

Organic and inorganic P reserves in rain-fed and irrigated calcareous soils under long-term organic and conventional agriculture. J. Romanyà y P. Rovira en *Geoderma*, vol. 151, págs. 378-386, 2009.

La reposición de la fertilidad en los sistemas agrarios tradicionales. R. Garrabou-Segura y M. González de Molina en *Perspectivas Agroecológicas*, n.º 8. Icaria Editorial, Capellades, 2010.

An appraisal of soil organic C content in Mediterranean agricultural soils. J. Romanyà y P. Rovira en *Soil use and Management*, vol. 27, págs. 321-332, 2011.

C and N stocks and N mineralisation in organically-managed soils amended with composted manures. J. Romanyà, N. Arco, I. Solà-Morales, L. Armengot y F. X. Sans en *Journal of Environmental Quality*, 2012.

RAYOS GAMMA EN EL INTERIOR DE LAS NUBES



Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria. La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás habíamos imaginado

Joseph R. Dwyer y David M. Smith

En 1991, poco después de que el transbordador espacial *Atlantis* pusiese en órbita el Observatorio de Rayos Gamma Compton (CGRO), Gerald Fishman, del Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA, se percató de algo muy extraño. Aquel equipo, diseñado para detectar la radiación procedente de objetos astrofísicos remotos, como las estrellas de neutrones o los remanentes de supernova, había comenzado a registrar intensas ráfagas de rayos gamma de unos milisegundos de duración. Pero estas no procedían del espacio exterior, sino de la Tierra.

Por entonces ya se sabía que, en ciertos procesos astrofísicos (como las erupciones solares, la acreción de materia por parte de un agujero negro o las explosiones estelares), los electrones y otras partículas dotadas de carga eléctrica se aceleran a velocidades tan elevadas que acaban emitiendo rayos gamma: los fotones más energéticos del espectro electromagnético. En tales casos, sin embargo, las partículas se mueven en un medio casi vacío. ¿Cómo explicar tales emisiones en la atmósfera terrestre, un medio denso?

Aunque en un principio supusimos que aquellos destellos de rayos gamma se originaban a unos 60 kilómetros por encima de las nubes, hoy sabemos que se producen a una altitud mucho menor, provocados por las descargas eléctricas que tienen lugar en el interior de las nubes de tormenta ordinarias. Con todo, cada uno de los sucesivos modelos que se han venido proponiendo para explicar el fenómeno ha tenido que vérselas con nuevos desafíos observacionales: una y otra vez, se han detectado energías consideradas inalcanzables en los procesos atmosféricos. Para nuestra sorpresa, hemos llegado incluso a detectar la creación de antimateria.

Veintiún años más tarde, contamos con varias pistas prometedoras para entender el origen de los destellos de rayos gamma terrestres, pero las incertidumbres persisten. Un elemento que se suma a este fascinante enigma procede de sus posibles implicaciones para la salud humana: si un vuelo se aproximase demasiado a las zonas en las que se generan dichos destellos, la radiación podría suponer un riesgo para los pasajeros.

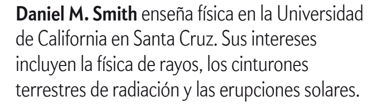
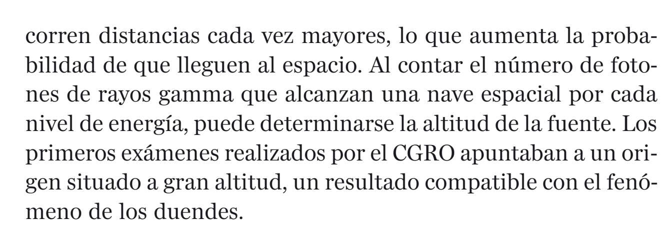
¿DOS PÁJAROS DE UN TIRO?

En un principio, los expertos se preguntaron si aquellos rayos gamma guardarían alguna relación con otra maravilla atmosférica. Pocos años antes se había descubierto que, muy por encima de las nubes de tormenta, a unos 80 kilómetros de altitud, se producían breves y brillantes fogonazos de luz roja, de varios kilómetros de anchura y cuyo aspecto recordaba al de una medusa gigante.

Esas impresionantes descargas eléctricas recibieron el caprichoso apodo de «duendes» (de la voz inglesa *sprite*, también llamados «espectros» o «espectros rojos»). Debido a que el fenómeno tenía lugar en el límite superior de la atmósfera, parecía plausible que pudiesen emitir rayos gamma detectables por una sonda espacial en órbita.

No tardaron en aparecer los primeros modelos que intentaron explicar la manera en que un duende podía generar rayos gamma dirigidos hacia el espacio. Se cree que los duendes se deben a un efecto secundario de los rayos ordinarios producidos en las nubes de tormenta, mucho más bajas. Un rayo es una vía conductora de electricidad que se abre temporalmente a través del aire; un medio que, en circunstancias normales, actúa como aislante. La descarga transporta electrones entre zonas de la atmósfera o entre esta y el suelo, y se produce cuando entre dichas regiones se crea un desequilibrio de carga electrostática. Ello induce diferencias de potencial que pueden superar los cien millones de voltios. Los intensos campos eléctricos asociados desencadenan la descarga.

STEPHEN ALVAREZ, GETTY IMAGES

Joseph R. Dwyer es astrofísico e investigador en el Instituto de Tecnología de Florida.

Daniel M. Smith enseña física en la Universidad de California en Santa Cruz. Sus intereses incluyen la física de rayos, los cinturones terrestres de radiación y las erupciones solares.

Esa violenta ráfaga de electrones reestablece en parte el equilibrio electrostático. Sin embargo, de modo similar a lo que ocurre al pisar una arruga en una alfombra (que, a menudo, brota una nueva en otro lugar), una descarga en el interior de una nube puede crear un campo eléctrico en otra zona. En ocasiones se trata del suelo, desde donde más tarde podrá surgir un rayo ascendente. Otras ocurrirá en la parte inferior de la ionosfera, en cuyo caso quizá se genere un duende. En 1992, Alexánder V. Gurévich, del Instituto de Física Lébedev de Moscú, y sus colaboradores calcularon que esos campos eléctricos secundarios próximos a la ionosfera podían producir avalanchas de electrones muy energéticos. Estos, al chocar contra los átomos, liberarían fotones de rayos X o incluso gamma, además del resplandor rojo tan característico de los duendes.

Dicho mecanismo se basaba en una idea que el premio nóbel Charles T. R. Wilson había propuesto en los años veinte del siglo pasado. A energías bajas, los electrones impulsados por un campo eléctrico proceden como marineros borrachos: rebotan de molécula en molécula y, en cada colisión, pierden energía. Sin embargo, cuando su velocidad supera cierto umbral, su trayectoria se torna más rectilínea y el campo eléctrico incrementa aún más su velocidad. Ello provoca que cada colisión resulte menos eficiente a la hora de perturbar la senda de los electrones, los cuales se ven inmersos en un proceso de ganancia energética que se refuerza a sí mismo. Nótese que ello choca con nuestra experiencia cotidiana, en la que —como corroborará cualquier ciclista— cuanto más rápido nos movemos, más resistencia aerodinámica experimentamos.

En principio, cabe esperar que esos electrones «fugitivos» alcancen velocidades próximas a las de la luz y avancen varios kilómetros antes de detenerse; en contraste con los escasos metros que, en circunstancias normales, recorrería un electrón a través del aire. El equipo de Gurévich razonó que cuando uno de esos electrones tan veloces chocase finalmente contra una molécula del aire, podría liberarse otro electrón muy energético que, a su vez, imitaría el comportamiento del primero. El resultado se asemejaría a una reacción en cadena: una avalancha de electrones de alta energía que crece de manera exponencial con la distancia recorrida y que puede extenderse a toda la zona en la que reine el campo eléctrico. Gurévich y sus colaboradores calcularon que ese efecto de avalancha podría aumentar en varios órdenes de magnitud la producción de rayos X y gamma. Su propuesta se antojaba muy atractiva, pues unificaba dos fenómenos atmosféricos en principio independientes: los duendes y los destellos de rayos gamma. Sin embargo, la realidad habría de mostrarse mucho más enrevesada.

LA INOCENCIA DEL DUENDE

A partir de 1996 se desarrollaron versiones cada vez más refinadas de la teoría que modelizaba los duendes como avalanchas de electrones fugitivos generadoras de rayos gamma. Un indicio en favor de este modelo provenía del espectro de energías de esos fotones. En el aire, los rayos gamma más energéticos recorren distancias cada vez mayores, lo que aumenta la probabilidad de que lleguen al espacio. Al contar el número de fotones de rayos gamma que alcanzan una nave espacial por cada nivel de energía, puede determinarse la altitud de la fuente. Los primeros exámenes realizados por el CGRO apuntaban a un origen situado a gran altitud, un resultado compatible con el fenómeno de los duendes.

Pero aquella hipótesis experimentó un vuelco en 2003. En el curso de una investigación en Florida, consistente en medir la radiación X que llegaba al suelo desde un rayo provocado de manera artificial por un cohete, uno de nosotros (Dwyer) y sus colaboradores detectaron un destello muy intenso de rayos gamma procedente de la nube de tormenta situada justo sobre sus cabezas [*véase* «El rayo», por Joseph R. Dwyer; Investigación y Ciencia, julio de 2005]. Aunque la ráfaga inundó el terreno de los alrededores, su energía y duración (unos 0,3 milisegundos) resultaron idénticas a las de los destellos de rayos gamma que, hasta entonces, se pensaba que solo se originaban a decenas de kilómetros más arriba. Por entonces, se suponía que tales destellos emanaban de alturas demasiado elevadas como para poder ser vistos desde el suelo. Aquella semejanza parecía sugerir que, tal vez, los rayos gamma que llegaban hasta el CGRO hubiesen sido generados por rayos de tormenta en el interior de las nubes. Al mismo tiempo, la idea se antojaba descabellada: para alcanzar el espacio a través de toda esa atmósfera, la intensidad de los destellos tendría que haber sido descomunal.

Otros acontecimientos acabaron con el pretendido vínculo entre duendes y rayos gamma. En 2002, la NASA había lanzado el Espectroscopio de Imágenes Solares de Alta Energía Reuven Ramaty (RHESSI) para estudiar los rayos X y gamma procedentes del Sol. Los grandes detectores de germanio del RHESSI resultaban perfectos para medir los rayos gamma atmosféricos, si bien estos debían penetrar en la nave atravesando su parte posterior mientras esta se encontraba de cara a la estrella. Uno de nosotros (Smith), por entonces a cargo del equipo de instrumentación del RHESSI, contrató a la estudiante de la Universidad de California en Berkeley Liliana López para que analizase el torrente de datos que el RHESSI había acumulado durante años y, entre ellos, buscase algún indicio de rayos gamma procedentes de altitudes inferiores. En esa época se pensaba que los destellos de rayos gamma terrestres eran extremadamente raros;

EN SÍNTESIS

Hace un tiempo, los observatorios espaciales descubrieron que las nubes de tormenta emiten destellos de rayos gamma muy intensos, de apenas unos milisegundos de duración.

Dichas ráfagas también pueden producir haces de electrones muy energéticos e incluso antimateria. En ocasiones, estas partículas llegan de un extremo a otro del planeta.

Las teorías que intentan explicar el fenómeno suponen la creación de campos eléctricos tan intensos que provocarían avalanchas de electrones en el interior de las nubes.

Sin embargo, ningún modelo ha logrado dar cuenta de todos los detalles del proceso. Se ignora si tales emisiones de radiación suponen algún riesgo para los vuelos comerciales.

sin embargo, López descubrió que el RHESSI había estado detectando uno cada pocos días, unas diez veces más que los observados por el CGRO.

El RHESSI medía la energía de los fotones de rayos gamma con una precisión mucho mayor que el CGRO. Su espectro guardaba grandes semejanzas con lo que cabía esperar a partir de la hipótesis de los electrones fugitivos. Pero, al compararlo con las simulaciones, dedujimos que los rayos gamma habían atravesado un largo camino a través de la atmósfera. Su origen se situaba a una altitud de entre 15 y los 22 kilómetros, correspondiente a la parte superior de las nubes de tormenta, pero muy por debajo de los casi 80 kilómetros a los que se producen los duendes.

Poco después aparecieron más indicios en favor de un origen a baja altitud. Steven Cummer, de la Universidad Duke, tomó mediciones de radio de algunos de los rayos de tormenta asociados a los sucesos de rayos gamma registrados por el RHESSI. Sus resultados mostraron que esos destellos de rayos gamma carecían de la intensidad necesaria para generar duendes. Por otro lado, la distribución mundial de destellos obtenida por RHESSI guardaba una llamativa semejanza con el mapa global de rayos de tormenta ordinarios, muy concentrados en los trópicos. Sin embargo, no se correlacionaba con el reparto de duendes, agrupados ocasionalmente en latitudes mayores.

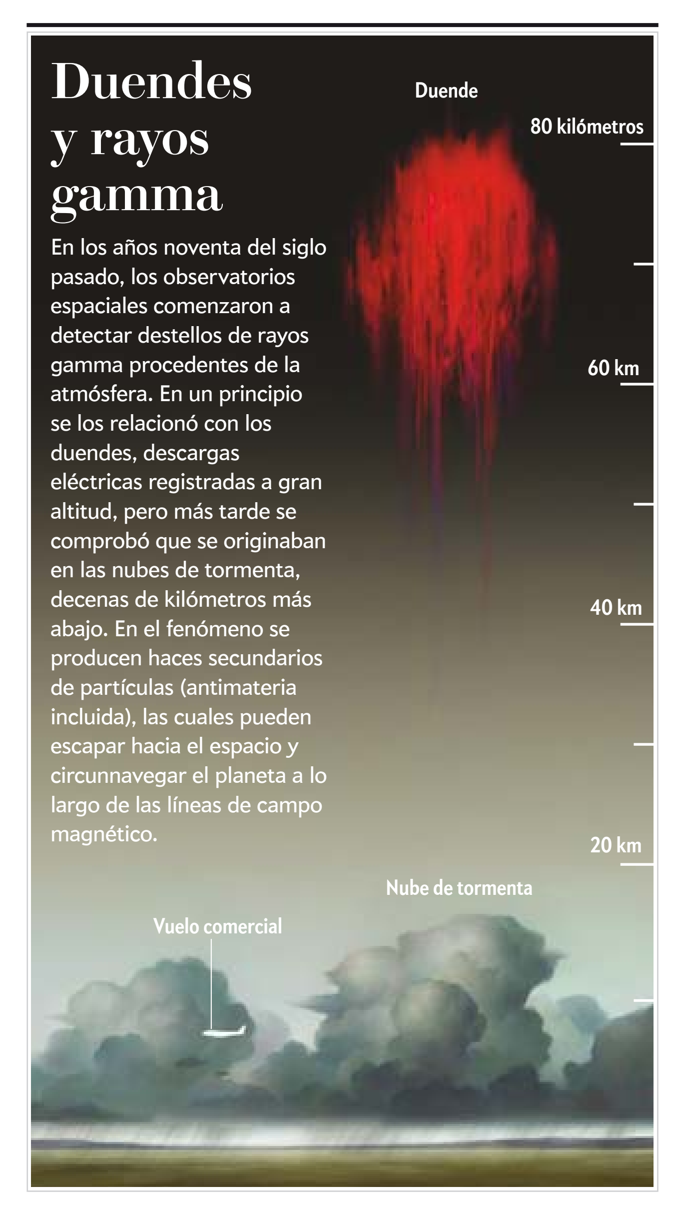
Con todo, aún quedaba un argumento para adjudicar a los duendes el origen de los destellos de rayos gamma: el espectro de energías de los sucesos registrados por el CGRO parecía apuntar a una fuente situada a gran altitud, más compatible con los duendes que con las tormentas. Muchos comenzamos a creer en la existencia de destellos de rayos gamma de dos tipos, según la altitud de la fuente. Pero el golpe final a la asociación con los duendes cayó cuando nos apercibimos de que los destellos de rayos gamma terrestres eran mucho más intensos de lo que pensábamos. En 2008, junto con el estudiante de doctorado Brian Grefensttete, demostramos que su intensidad llegaba a tales extremos que cegaban parcialmente los instrumentos del CGRO (una saturación que también afectaba al RHESSI, aunque en menor medida). En 2010, otro equipo de la Universidad de Bergen volvió a analizar los datos tomando en consideración la sobrecarga del equipo. Sus resultados se mostraron compatibles con una fuente situada a cotas bajas.

Así pues, en menos de dos años, la altitud a la que se suponía que se originaban los destellos de rayos gamma terrestres se redujo en más de 50 kilómetros. En ciencia no suele verse muy a menudo un cambio de paradigma tan rápido. Ello no deja de resultar irónico: cuando comenzamos a trabajar en este campo, hace una década, los duendes constituían un brillante ejemplo de radiación muy energética cuyo origen podía situarse en la atmósfera; hoy, en cambio, se diría que casi cualquier fenómeno (nubes de tormenta, rayos de varias clases, chispas de laboratorio...) parece producir radiación detectable de alta energía, pero no así los duendes. En la actualidad se admite que, debido a la baja energía de su radiación, los duendes quedan descartados como fuente de los destellos de rayos gamma terrestres.

ANTIMATERIA EN LAS NUBES

Pero, si los duendes no son la causa de los destellos de rayos gamma, ¿qué los provoca? ¿Tienen algo que ver en el proceso las avalanchas de electrones? Por un lado, se ha demostrado que el modelo de avalancha propuesto por Gurévich y sus colaboradores predice energías demasiado elevadas como para que el fenómeno guarde relación con los duendes. Por otro, su potencia no basta para explicar las grandes luminosidades detectadas por el RHESSI o el CGRO. Nuestros cálculos (Dwyer), no obstante, habían mostrado que una versión «supercargada» del mecanismo de avalancha de electrones sí podría liberar en el seno de las nubes una energía billones de veces mayor de lo que se pensaba. Dicho modelo, sin embargo, implicaba algo sorprendente: la producción de ingentes cantidades de antimateria.

Si el campo eléctrico en el interior de una nube tormentosa fuera lo bastante intenso, los electrones fugitivos —suponiendo que se hayan originado de algún modo— deberían acelerarse hasta casi la velocidad de la luz y, al chocar con los núcleos atómicos de las moléculas del aire, emitirían rayos gamma. A su vez, esos fotones podrían interaccionar con los núcleos atómicos y crear pares de partículas compuestos por un electrón y un positrón (el «gemelo» de antimateria del electrón). Estos últimos también experimentarían una fuerte aceleración en el campo eléctrico, pero, mientras que los electrones se dirigen hacia arriba, los positrones, de carga opuesta, lo harían hacia abajo. Al alcanzar el límite inferior de la región



BRIAN DESPAIN

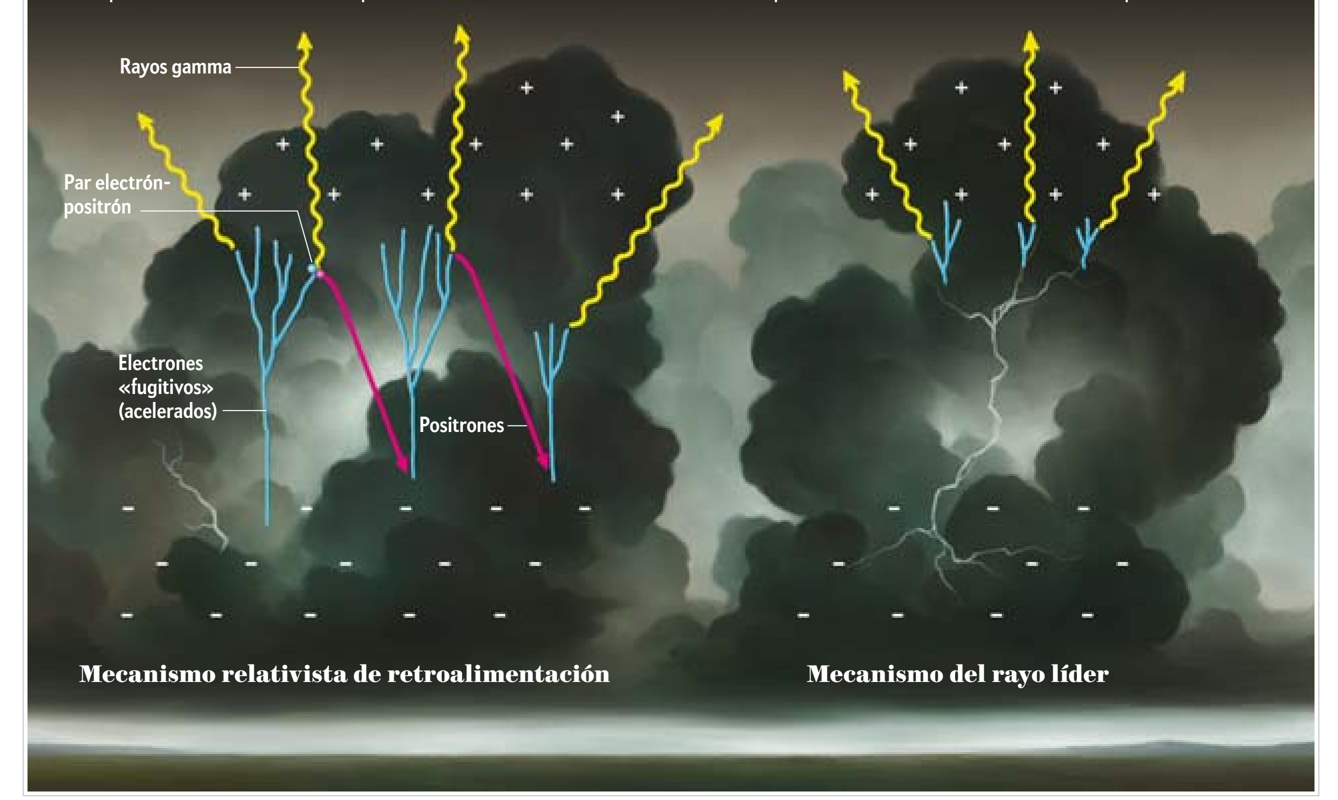
POSIBLES EXPLICACIONES

¿Qué origina los destellos de rayos gamma?

Los expertos convienen en que los rayos gamma terrestres probablemente se deban a cascadas de electrones que, una vez liberados de sus átomos, se aceleran hasta casi la velocidad de la luz en los intensos campos eléctricos que se crean en el interior de las nubes de tormenta. Al chocar contra los núcleos atómicos de las moléculas del aire, emitirían rayos gamma. No obstante, algún mecanismo adicional debe tomar parte para dar cuenta de las elevadas energías de esos fotones, equiparables a las que se observan en las erupciones estelares.

Según el modelo relativista de retroalimentación (*izquierda*), algunos rayos gamma generarían más materia: pares de partículas formados por un electrón y un positrón, el «gemelo» de antimateria del electrón. En razón de su carga (opuesta a la de los electrones), los positrones serían acelerados hacia la parte inferior de la nube, donde producirían nuevas cascadas de electrones.

En la hipótesis del rayo líder (*derecha*), un relámpago de gran potencia liberaría nuevas cascadas de electrones en su camino desde la parte inferior de la nube hasta la cúspide.



BRIAN DESPAIN

en la que existe campo eléctrico, chocarían contra los átomos del aire y producirían más electrones, que de nuevo serían acelerados hacia arriba.

Así, los electrones ascendentes generarían positrones dirigidos hacia abajo, los cuales crearían nuevos electrones que se desplazarían hacia arriba, y así sucesivamente. Dado que una avalancha engendraría otras, las descargas se extenderían con rapidez sobre la nube hasta cubrir una anchura de varios kilómetros. Las cifras predichas por esta hipótesis, conocida como modelo relativista de descarga con retroalimentación, se correspondían a la perfección con la intensidad, duración y espectro de energía de los rayos gamma registrados por el CGRO y el RHESSI.

La retroalimentación positiva de los positrones resulta análoga al molesto chirrido que se produce al acercar un micrófono a un altavoz. Pero, por otro lado, para producir un estruendo basta también con gritar en el micrófono. Este razonamiento ilustra otra posible explicación del fenómeno, si bien sus detalles matemáticos aún no se conocen por completo: que los destellos de rayos gamma sean versiones «amplificadas» de las ráfagas de rayos X que un rayo de tormenta emite al aproximarse al suelo.

Durante varios años, investigadores del Instituto de Tecnología de Florida, la Universidad de Florida y el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México han estado midiendo esos rayos X, tanto los que proceden de rayos activados artificialmente por cohetes como los originados por rayos naturales. Las «películas» registradas en Florida con una cámara rápida de rayos X muestran que esas ráfagas emanan de la punta del canal del rayo cuando este se dirige desde la nube hacia el suelo. La mayoría de los científicos piensan que los rayos X son producidos por electrones fugitivos que se ven acelerados por el intenso campo eléctrico existente en la parte frontal del rayo. Por razones que aún debemos descifrar, puede que un rayo que avanza a través del campo eléctrico de la nube resulte más eficiente a la hora de producir electrones fugitivos. Si esta idea se revela correcta, los destellos vistos desde las naves espaciales que orbitan a cientos de kilómetros de distancia podrían no ser sino una versión —amplificada a través de algún mecanismo aún desconocido— de la misma radiación X generada por los

rayos y que, desde el suelo, detectan los instrumentos situados a unos metros de la descarga.

CIELOS DESPEJADOS

Con independencia del papel que desempeñasen en ello la antimateria o los rayos reforzados, hacia finales de 2005 nos hallábamos convencidos de que la mayoría de los destellos de rayos gamma terrestres se originaban en el interior de las nubes de tormenta o cerca de su borde superior. Sin embargo, antes de que pudiéramos acomodarnos a este nuevo modelo, algo pareció cuestionar una vez más nuestra comprensión de los hechos: el RHESSI captó un destello de rayos gamma en medio del desierto del Sáhara, en un día soleado y sin ninguna nube de tormenta a la vista.

Nuestro equipo debatió el fenómeno durante meses. Aquel día sí se habían formado nubes de tormenta, pero no en el área que la nave había estado observando, sino varios miles de kilómetros hacia el sur del horizonte del RHESSI. Aunque allí se hubieran generado rayos gamma, estos jamás podrían haber alcanzado la nave: como cualquier clase de luz, los rayos gamma viajan siempre en línea recta.

Las partículas dotadas de carga eléctrica, sin embargo, proceden en estrechas espirales enrolladas alrededor de las líneas del campo magnético terrestre, que sí son curvas. De hecho, las tormentas que se habían desatado aquel día lo habían hecho en el otro extremo de la línea de campo magnético que atravesaba la nave espacial. Si algunos electrones hubiesen alcanzado altitudes lo suficientemente elevadas, podrían haber circunnavegado el planeta hasta chocar con los detectores del RHESSI y, en el proceso, habrían emitido rayos gamma. Con todo, parecía imposible que los electrones liberados en el seno de una nube de tormenta pudiesen atravesar tantísimos kilómetros de atmósfera y llegar a una altitud que les permitiese embarcar en una trayectoria a lo largo de una de las líneas del campo magnético terrestre. Aquella nueva observación parecía exigir, una vez más, un origen a altitudes elevadas.

El año pasado, el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi observó más haces circunnavegantes y realizó un descubrimiento sorprendente: una parte considerable de ellos se componía de positrones. Así, parece que los fenómenos atmosféricos pueden lanzar al espacio no solo electrones y rayos gamma, sino también partículas de antimateria. En retrospectiva, deberíamos haber esperado detectar esos positrones en razón de la elevada energía de los rayos gamma. Aun así, considerando lo inusual que resulta observar antimateria en la naturaleza, el hallazgo del telescopio Fermi causó una gran sorpresa.

Poco después, nuestro equipo mostró que la explicación al hallazgo del Sáhara no era que los rayos gamma proviniesen de altitudes muy elevadas: se producen en las nubes de tormenta, pero en cantidades mucho mayores de lo que nadie había creído posible. De tanto en tanto, algunos de los que salen en dirección al espacio chocan contra las moléculas del aire a más de 40 kilómetros de altitud y crean pares secundarios electrón-positrón. Después, estos cabalgan alrededor del globo sobre una de las líneas del campo magnético terrestre. La próxima vez que presencie una nube de tormenta, recuerde que tal vez esté lanzando hacia el espacio partículas de muy alta energía que podrán detectarse al otro lado del planeta.

MÁS SUCESOS EXTRAORDINARIOS

Pero la observación de positrones no fue lo último que cautivó nuestra atención. Algún tiempo después, en 2011, el observatorio AGILE, de la Agencia Espacial Italiana, descubrió que el espectro de energía de los destellos de rayos gamma terrestres alcanzaba los 100 megaelectronvoltios, algo insólito incluso para una erupción solar. De ser correctas, dichas observaciones arrojan dudas sobre nuestros modelos, ya que parece sumamente improbable que los electrones fugitivos puedan generar energías de tal calibre. De hecho, no queda claro qué podría acelerarlos a semejante velocidad en el interior de una nube. Llegados a este punto, se requieren más observaciones que guíen las propuestas teóricas. Por fortuna, varios equipos de EE.UU., Europa y Rusia ya han comenzado a lanzar las primeras misiones espaciales dedicadas a la detección de rayos gamma terrestres.

Mientras tanto, nuestros equipos han construido un instrumento que, instalado en un avión, mide los rayos gamma producidos en las tormentas. Debido a los peligros que conlleva exponerse a esta radiación, evitamos volar directamente hacia una tempestad. Sin embargo, en un primer vuelo de prueba en el que tomamos parte (Dwyer), el avión realizó un viraje equivocado. La sensación de terror fue pronto sustituida por la emoción, ya que los detectores se activaron de inmediato. Un análisis posterior mostró que en aquella zona se estaban acelerando electrones fugitivos de la misma clase que los que, suponemos, producen los destellos de rayos gamma. Por suerte, la emisión se mantuvo en un nivel bajo y no experimentó el crecimiento explosivo que caracteriza a los sucesos detectados desde el espacio. Gracias a estos vuelos hemos descubierto que, muy a menudo, las tormentas generan una emisión difusa, continua y relativamente inocua de rayos gamma.

Con todo, algunos cálculos preliminares muestran que, si un vuelo comercial fuese alcanzado directamente por electrones de alta energía y rayos gamma en el corazón de una tormenta, los pasajeros y los miembros de la tripulación podrían recibir en una fracción de segundo la dosis de radiación natural considerada admisible durante toda la vida; todo ello sin notar absolutamente nada. La buena noticia es que no necesitamos recomendar a los pilotos que se aparten de las tormentas, puesto que ya proceden así: se trata de un fenómeno lo bastante peligroso como para sumergirse en él, con o sin rayos gamma.

En cierto modo, el estudio de los destellos de rayos gamma terrestres completa el trabajo de Benjamin Franklin, quien supuestamente lanzó una cometa hacia una tormenta para determinar si era conductora de la electricidad y, de esta manera, demostrar que el rayo consistía en una descarga eléctrica. Por sorprendente que pueda parecer, dos siglos y medio después no solo ignoramos el mecanismo por el que las nubes de tormenta producen destellos de rayos gamma; desconocemos también cómo generan simples rayos. Hemos invertido gran parte de nuestras carreras profesionales en el estudio de lejanos y exóticos objetos ajenos al sistema solar, pero la Tierra ha reclamado de nuevo nuestro interés por el aliciente de estas investigaciones. Probablemente, Benjamin Franklin jamás llegó a sospechar lo interesante que podía resultar una tormenta.

PARA SABER MÁS

Discovery of intense gamma ray flashes of atmospheric origin. G. J. Fishman et al. en *Science*, vol. 264, págs. 1313-1316, 27 de mayo de 1994.

Runaway breakdown and the mysteries of lightning. Alexander V. Gurévich y Kirill P. Zybin en *Physics Today*, vol. 58, n.º 5, págs. 37-43, mayo de 2005.

Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes. J. R. Dwyer en *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, n.º D10103, 20 de mayo de 2008.

Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM. Michael S. Briggs et al. en *Geophysical Research Letters*, vol. 38, n.º L02808, 20 de enero de 2011.

por Rose Eveleth

Abejas atareadas

Los polinizadores de orquídeas exhiben una promiscuidad sorprendente en sus preferencias por las plantas

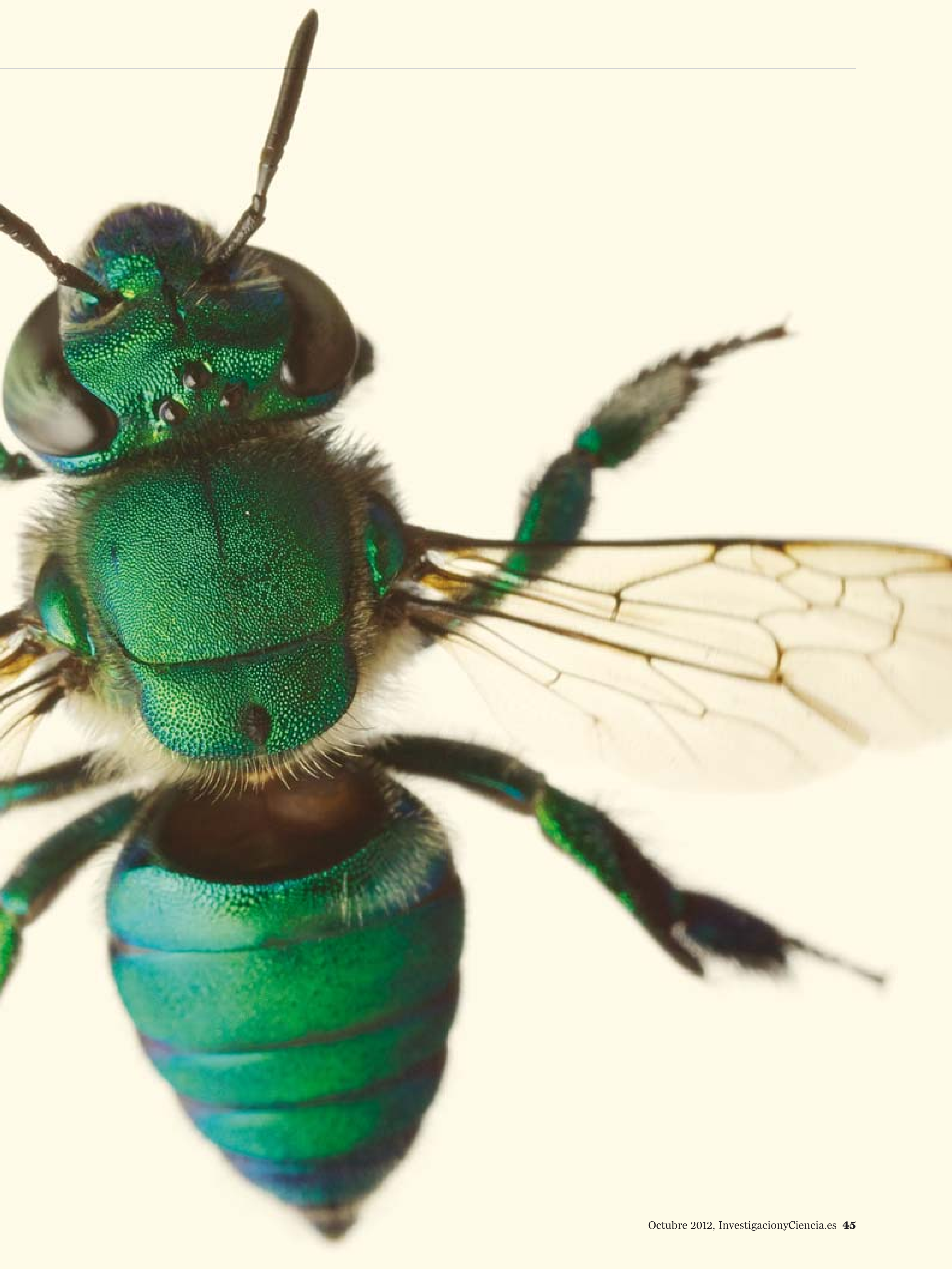
Los biólogos han creído durante largo tiempo que las abejas de las orquídeas y estas bellas plantas confiaban unas en otras por igual. Estas brillantes abejas polinizan las orquídeas a cambio de las fragancias desprendidas por las flores, que los zánganos utilizan a modo de reclamo para las hembras. Por eso se pensaba que insecto y planta habían evolucionado a la par. Pero un estudio dirigido por Santiago Ramírez, de la Universidad de California en Berkeley, publicado a finales de 2011 en *Science* revela que las abejas surgieron primero, lo cual sugiere que ambas especies son más independientes de lo que se pensaba.

El trabajo de Ramírez demuestra que pese a la gran adaptación que las orquídeas parecen mostrar hacia las abejas, a tenor del desarrollo de sustancias atractivas para ellas y de mecanismos para depositar el polen sobre su cuerpo, estos insectos no están ni mucho menos tan especializados. Las abejas recolectan las esencias de más de 700 especies de plantas y polinizan una amplia gama de ellas. Según Ramírez, sabemos muy poco sobre cómo surgen y crecen las redes de interacciones entre abejas y plantas.

Aprender más sobre las abejas podría ayudar a entender su papel en la polinización de las orquídeas tropicales, muchas de las cuales se hallan en peligro de extinción. Las propias abejas también sufren la amenaza de la deforestación y la fragmentación del territorio en Centroamérica y Sudamérica, procesos que están acabando con su hábitat y sus recursos alimenticios. Tanto es así que André Nemésio, de la Universidad Federal de Uberlândia en Brasil, que estudia a estos esquivos himenópteros, teme que los científicos no tendrán el tiempo suficiente para aprender lo necesario para salvarlas. Las abejas de las orquídeas son solitarias, muy asustadizas y resultan casi imposibles de ver en la selva. Además, como nadie sabe exactamente lo importantes que son para las plantas que polinizan o para sus depredadores, las consecuencias de su pérdida constituyen otro misterio más.

DAVID LIITTSCHWAGER





por Michael Friedlander

Michael Friedlander es profesor emérito del departamento de física de la Universidad Washington en San Luis, Misuri.



Un siglo de rayos cósmicos

La exploración del universo extremo

«Sobre las capas más altas de la atmósfera incide una fina lluvia de partículas cargadas, proveniente del espacio exterior y conocida como radiación cósmica primordial.» Con estas palabras sobre la naturaleza de los rayos cósmicos daba comienzo Cecil Powell a su discurso en la ceremonia de los Nobel de 1950.

El galardón le fue concedido por el desarrollo del método fotográfico para identificar las partículas de alta velocidad y vida efímera, producto de colisiones muy energéticas, que aparecían de forma imprevista en los estudios de rayos cósmicos. Al mismo tiempo, ese método se utilizaba para descubrir nuevos componentes de la «fina lluvia» de Powell: los núcleos atómicos pesados. Estos dos frentes, el estudio de los rayos cósmicos primarios y de los productos de sus colisiones, continúan formando el tejido de la investigación actual.

Aunque hoy en día las colisiones entre partículas se estudian mediante del uso de gigantescos aceleradores, la única ventana al comportamiento de las partículas de mayor energía sigue siendo el examen de los rayos cósmicos. El estudio de la radiación cósmica primordial forma parte de la astrofísica contemporánea: mediante la comparación de la composición de los rayos cósmicos con la de las estrellas, es posible identificar su procedencia e investigar los procesos estelares violentos.

Este año se celebra el centenario del descubrimiento de los rayos cósmicos por Victor Hess. La investigación en este campo se ha ido extendiendo en direcciones que él mismo jamás habría imaginado, desde el descubrimiento de la antimateria hasta la datación por ^{14}C en arqueología; incluso ha desempeñado un destacado papel en los orígenes de la «gran ciencia».

Fuente de radiación

Las investigaciones de Hess se llevaron a cabo en los embriagadores tiempos que sobrevinieron al descubrimiento de la radiactividad y el electrón. A principios del siglo pasado, una de las principales herramientas en el estudio de la radiactividad era el electroscopio, un sensible dispositivo para medir la ionización producida por la radiación. Se descubrió en seguida que los componentes radiactivos de algunas rocas producían ionización; se creía que la corteza terrestre era la responsable de mantener un nivel básico de radiación. Para elucidar esta cuestión, los científicos sumergieron electroscopios en lagos y océanos, los subieron a las montañas e incluso los elevaron a mayor altitud, subidos en cestas transportadas por globos llenos de hidrógeno. Los resultados eran contradictorios: algunos mostraban un decremento de la ionización con la altura; otros, un aumento. Fue en esta época confusa cuando Hess, en 1911, comenzó su propia serie de experimentos en globos sonda.

Hess descubrió que la tasa de ionización primero disminuía con la altura, pero luego empezaba a aumentar hasta los 5,3 kilómetros, la máxima altitud que llegó a alcanzar. Ese vuelo tuvo lugar en la Bohemia del norte (hoy día parte de la República Checa), el 17 de abril de 1912, mientras un eclipse parcial de sol era visible desde gran parte de Europa. Hess no detectó el más mínimo descenso en la tasa de ionización durante el eclipse, lo cual indicaba que, cualquiera que fuese la fuente de radiación ionizante, no se trataba del Sol.

Nacido en Austria en 1883 y educado en la Universidad de Graz, en el momento del experimento Hess era un joven ayudante en el Instituto del Radio de la Academia Austriaca de Ciencias. Su descubrimiento le llevó a una serie de ascensos y a un mayor reconocimiento profesional, que culminó en un premio Nobel compartido en 1936. Con el deterioro de la situación política en Europa, Hess fue despedido de su puesto en la Universidad de Innsbruck en 1938 porque su mujer era judía. Consiguió escapar de Austria y aceptó un puesto de profesor en la Universidad de Fordham en Nueva York.

Durante algunos años, la naturaleza de los rayos cósmicos siguió siendo enérgicamente debatida entre los físicos. Robert Millikan (que acuñó el término «rayos cósmicos» en 1925) continuó insistiendo en que realmente eran «rayos» electromagnéticos, incluso después de que Arthur Compton hubiera establecido que se trataba de partículas, tal y como revelaba la manera en que eran desviadas por el campo magnético terrestre.

El estudio experimental de los rayos cósmicos ha ido en muchas ocasiones por delante de la teoría, dando lugar a un buen número de descubrimientos inesperados. Uno de los más espectaculares fue la observación de partículas de antimateria. La teoría cuántica relativista de Paul Dirac había predicho la existencia de antipartículas; Dirac especuló con la posibilidad de que pudieran existir anti-estrellas, hechas de anti-átomos con anti-electrones, pero no hizo predicción alguna sobre la búsqueda de antipartículas en la Tierra: desde luego, no entre los rayos cósmicos.

En 1911, C. T. R. Wilson desarrolló un nuevo instrumento para el estudio de los rayos cósmicos. Wilson llegó a la conclusión de que las gotas de agua se forman en la atmósfera por condensación del vapor sobre los iones y trasladó esta intuición a un potente dispositivo de laboratorio (la cámara de niebla) en el que el paso de partículas dotadas de carga eléctrica deja un rastro de gotas líquidas. En 1932, cuando Carl Anderson estaba usando una cámara de niebla de Wilson con un potente imán para estudiar los rayos cósmicos, observó una partícula que tenía la misma masa que el electrón, pero carga positiva. El descubrimiento del positrón, como Anderson bautizó a la partícula, fue reconocido con el premio Nobel que compartió en 1936 con Hess.

Durante el período comprendido entre 1947 y 1956, cuando los estudios de rayos cósmicos se reanudaron tras la Segunda Guerra Mundial, multitud de nuevas partículas subatómicas (hiperones, piones y kaones) fueron descubiertas utilizando emulsiones fotográficas y cámaras de niebla. Este complejo «zoológico de partícu-

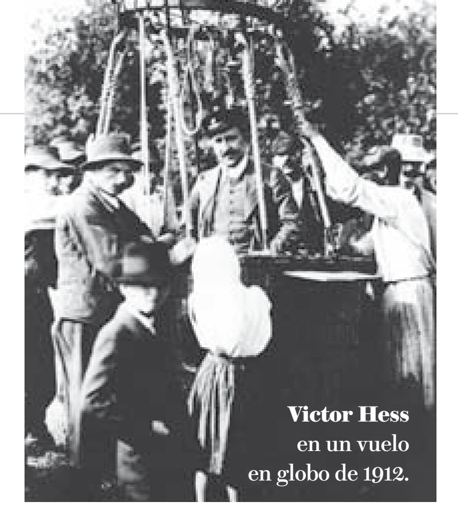
las», supuso una auténtica convulsión para la física teórica.

Mientras tanto, el estudio de la radiación cósmica primaria también iba avanzando. Se descubrieron núcleos mucho más pesados que el helio. Gracias a las subsiguientes mejoras de las técnicas experimentales, las proporciones de los distintos núcleos que forman parte de los rayos cósmicos, y algunos de sus isótopos, han podido determinarse con precisión.

Las proporciones de los elementos químicos entre los rayos cósmicos pueden compararse con sus abundancias en el sistema solar, en las atmósferas de estrellas lejanas o en los remanentes de las explosiones de supernova, con el fin de identificar los objetos o regiones donde se originan los rayos cósmicos. Asimismo, los científicos también tratan de identificar las regiones en que los rayos cósmicos se aceleran hasta energías altísimas, dando lugar a las partículas que viajan a velocidades próximas a la de la luz. La energía cinética más elevada medida para una única partícula de rayos cósmicos es equiparable a la de una pelota de béisbol moviéndose a ciento sesenta kilómetros por hora, más de cien millones de veces superior a la de los protones acelerados en el LHC del CERN.

Esas partículas de ultraalta energía son poco comunes; apenas unas pocas por kilómetro cuadrado llegan a la Tierra cada siglo. Debido a las colisiones que sufren en la atmósfera, generan miles de millones de partículas, lo que requiere un gran número de detectores, distribuidos sobre una superficie muy amplia. Los rayos gamma de alta energía, que también se producen en las fuentes de rayos cósmicos, pueden detectarse igualmente por estos instrumentos de gran área. Sus direcciones de llegada pueden señalar a las fuentes, como remanentes de supernova o galaxias activas. La exploración continuada de estas partículas y fotones de la más alta energía podrían darnos información sobre las condiciones en las etapas primitivas (y muy calientes) del universo.

Los estudios de rayos cósmicos se han desarrollado por derroteros imprevistos. Los rayos cósmicos han sido identificados como la fuente principal del isótopo radiactivo ^{14}C, producido en las colisiones con el nitrógeno atmosférico. La cantidad de ^{14}C producido en la atmósfera depende del número de rayos cósmicos que llegan a la Tierra, que a su vez depende del ciclo de once años de actividad solar. La medida del ^{14}C ha revolucionado la arqueología, haciendo posible la determinación de la edad de los restos de materia orgánica.



Victor Hess en un vuelo en globo de 1912.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Consecuencias cósmicas

El descubrimiento de Hess surgió de observar los efectos de la ionización producida por los rayos cósmicos. El mismo efecto está teniendo lugar ahora mismo sobre nuestro cuerpo, conforme los rayos cósmicos lo atraviesan. A lo largo de nuestra vida, acumulamos una dosis de radiación que causa daños biológicos, lo que posiblemente contribuye al desarrollo de un nivel mínimo de cáncer entre la población. Fuera de la protección de la atmósfera, los astronautas acumulan dosis de radiación por rayos cósmicos que pueden llegar a rebasar los límites considerados seguros; ello podría limitar la distancia a la que los astronautas pueden viajar.

En la actualidad, la escala de las investigaciones en física se ha expandido hasta tal punto que no es extraño encontrarse con que un solo artículo científico ha sido firmado por cientos de autores, cruzando las fronteras y empleando instrumentación financiada conjuntamente por varios países. El origen de esta revolución también se remonta a los rayos cósmicos. Las demandas presupuestarias y de mano de obra de la investigación en rayos cósmicos durante la década de los años cincuenta del siglo pasado ya iban más allá de la capacidad de cualquier grupo aislado. La colaboración G-stack, de la cual el autor formó parte (en el grupo de investigación de Powell, en la Universidad de Bristol), se creó para acometer el vuelo de una gigantesca pila (*stack*, en inglés) de detectores fotográficos a bordo de un globo. La emulsión fotográfica especial, fabricada por la empresa Ilford, se procesó en Bristol; el globo se voló en el norte de Italia; y las medidas y análisis fueron llevadas a cabo por grupos de Bristol, Bruselas, Copenhague, Dublín, Génova, Milán y Padua. Los resultados se publicaron en *Il Nuovo Ciménto* en 1955, en un artículo firmado por treinta y seis científicos, con mucho el mayor número de coautores hasta aquella fecha.

Ese estilo de grandes colaboraciones internacionales se ejemplifica hoy en el CERN, que, fundado en 1954, acoge el mayor acelerador de partículas jamás construido. Muchos de los fundadores destacados del CERN fueron investigadores en rayos cósmicos, incluidos Powell y Edoardo Amaldi, su primer director científico.

Una de las lecciones que hemos aprendido del estudio de los rayos cósmicos corresponde a la necesidad de examinar detenidamente cualquier observación en apariencia extraña, y no descartarla como parte del ruido de fondo. El descubrimiento de la antimateria se debió a la detección de una única traza de un positrón individual. El hallazgo de algunos kaones se basó en la observación de acontecimientos aislados. Aunque algunos descubrimientos surgen del análisis estadístico de grandes cantidades de datos, deberíamos recordar que también pueden realizarse importantes hallazgos a partir de una única observación.

Transcurridos cien años, la investigación en rayos cósmicos constituye un campo maduro, pero abierto a nuevas sorpresas. Los rayos cósmicos continúan estudiándose mediante globos, satélites en órbita alrededor de la Tierra y sondas espaciales de largo alcance, así como detectores en tierra a lo largo de enormes superficies, que buscan las fuentes de los rayos cósmicos más energéticos. También podrían identificarse antipartículas. Vuelos cada vez más largos y superficies más extensas están permitiendo la acumulación de datos sobre las partículas y los rayos gamma cósmicos, lo que incrementa la tasa de detección de los sucesos más infrecuentes.

Ya se conjetura que algunas de las partículas y rayos gamma de mayor energía provienen de objetos bien conocidos, como remanentes de supernova. Un mayor número de datos ayudaría a determinar la dirección de las fuentes y el mecanismo de aceleración. Tal vez las condiciones físicas sean aún más exóticas de lo que imaginamos. Es de esperar que esta rama de la física de astropartículas siga dando lugar a más premios Nobel en el futuro.

Artículo original publicado en *Nature* 483, págs. 400-401, 2012. Traducido con el permiso de

por Juan García-Bellido



Juan García-Bellido es profesor de física teórica en la Universidad Autónoma de Madrid e investigador del Instituto de Física Teórica del CSIC.

La relevancia de los Nobel

Luces, y algunas sombras, de los máximos galardones científicos

Entre los días 8 y 15 del presente mes se anunciarán en Estocolmo los ganadores de los premios Nobel de este año. Se trata de los galardones con mayor prestigio en el entorno intelectual. Además, tienen un reconocimiento social y una visibilidad que difícilmente pueden ser comparados con los de ningún otro premio. Pero ¿qué representan para la sociedad? ¿Por qué son tan importantes?

En una época en la que se están perdiendo gradualmente una serie de valores, fundamentalmente humanísticos, de convivencia y generosidad, los premios Nobel representan un último bastión. Buscamos en ellos una referencia, no solo de excelencia, sino también de honestidad, entusiasmo y entrega por unos ideales, que inspira tanto a profanos como a profesionales. De hecho, la mayoría de los galardonados eran ya reconocidos entre sus pares como individuos singulares, mucho antes de que fueran premiados. Y, después de serlo, no han dejado de comportarse como personas con enormes cualidades humanas. Tras recibir el premio, muchos de ellos han dedicado el resto de su vida a transmitir esa esencia personal que les hace ser tan especiales.

De todos los premios Nobel, los de ciencias (medicina, física y química) poseen un carácter más fundamental. Hay un grado de verdad asociada a ellos de la que carecen los de la paz y literatura (y el más joven de economía). Y, sin embargo, todos ayudan a construir lo que podríamos llamar la «gran humanidad». Sus descubrimientos no solo generan progreso y permiten a la sociedad desarrollarse, sino que también nos ayudan a comprendernos a nosotros mismos. Los conocimientos profundos sobre las leyes y los mecanismos que gobiernan la naturaleza pueden carecer de aplicación inmediata, pero nos hacen ser más conscientes del entorno y de nuestro lugar en el universo; nos ayudan a ser más modestos. Como decía Blaise Pascal, «la verdadera grandeza del hombre está en darse cuenta de su propia pequeñez». Los premios Nobel son, de hecho, los campeones de esa búsqueda de la verdad que nos hace humanos.

Este verano he tenido la suerte de asistir en Lindau a una reunión con unos treinta nóbeles de física, donde se respiraba ese sentimiento de humildad. Es posible que no todos los galardonados estuvieran de acuerdo con la importancia de algunos de los descubrimientos más recientes, e incluso que sostuvieran posturas diferentes sobre estos, pero no por ello dejarán de respetarse mutuamente y debatirán como caballeros, aunque sea con pasión y convicción. Pensemos en las discusiones de Martinus Veltman y David Gross acerca de la realidad del bosón de Higgs —cuyo descubrimiento fue noticia durante nuestra estancia en Lindau—, o en los debates de Brian Schmidt y George Smoot sobre el origen del universo. Aunque estos expertos posean visiones distintas, no dejan de escuchar a sus colegas ni de intentar convencerlos con sus argumentos. En definitiva, no dejan de hacer ciencia.



Precisamente por su relevancia, los premios Nobel quizá deberían revisar algunos de sus principios, poco acordes con la ciencia actual. El de la paz se ha concedido 18 veces a organizaciones internacionales no gubernamentales como la Cruz Roja, la ONU, Amnistía Internacional o Médicos Sin Fronteras. ¿Por qué no otorgar los más fundamentales (física, química y medicina) también a instituciones o colaboraciones, más que a un máximo de tres individuos, como marcan las normas actuales? En muchos casos sería probablemente lo más justo. Pensemos en la posible concesión del Nobel de física de 2012 por el descubrimiento del bosón de Higgs, un hito histórico que ha sido posible gracias a los varios miles de personas que han participado en las colaboraciones ATLAS y CMS del CERN. La concesión del galardón a dichas colaboraciones, por el extraordinario trabajo en común, reflejaría el reconocimiento de la sociedad a una nueva manera de hacer ciencia.

Asimismo, entre los premios Nobel se echan en falta algunas disciplinas, como las matemáticas o la biología. ¿Por qué no se actualiza y extiende la lista de áreas científicas? Este debate se ha venido planteando periódicamente. Pero el comité organizador se muestra reacio a aumentar el número de premios; considera que ya se tiene en cuenta esa diversificación en la asignación actual. Sin embargo, veo difícil en estos momentos el reconocimiento de hallazgos fundamentales en áreas bien diferenciadas de la biología como son la ecología, la paleontología o la teoría de la evolución, así como en topología, geometría y análisis funcional dentro de las matemáticas. Todas ellas han generado un enorme progreso en sus respectivas disciplinas y, sin embargo, no tienen las mismas posibilidades de ser reconocidas con el Nobel al carecer de un galardón asociado. Un debate sobre el futuro de los Nobel sería un sano ejercicio, que queda pendiente en la sociedad, y que en algún momento tendrá que ser analizado por el comité evaluador de los premios.

FOTOILUSTRACIÓN DE SCIENTIFIC AMERICAN; GETTY IMAGES (*medalla*)

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad

Cuadernos MENTE Y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

Vincent Artero investiga en el Laboratorio de Química y Biología de los Metales del Comisariado de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) de Grenoble. **Nicolas Guillet** es ingeniero e investigador en el Laboratorio de Innovación para la Tecnología en Nuevas Energías y Nanomateriales del CEA de Grenoble. **Daniel Fruchart,** director emérito de investigación en el Instituto Néel del Centro Nacional de Investigación Científica francés, en Grenoble, trabaja como director científico en la empresa McPhy-Energy. **Marc Fontecave** es profesor de bioquímica en el Colegio de Francia.

ENERGÍA

Hidrógeno: ¿Una energía limpia para el futuro?

Las técnicas para producir hidrógeno, almacenarlo y generar con él electricidad ya existen. La investigación actual busca aumentar la eficiencia del proceso y reducir sus costes

Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart y Marc Fontecave

Cuando la mayoría de los fabricantes de automóviles anuncian la inminente comercialización de vehículos eléctricos, ¿hemos aún de creer que el hidrógeno se convertirá en el combustible del siglo xxi, como se ha venido anunciando desde hace algunos años? La manera de extraer energía a partir de este gas se conoce desde hace largo tiempo. El funcionamiento de una pila de combustible (que produce electricidad y calor gracias a la recombinación de hidrógeno gaseoso y oxígeno del aire, con agua como único producto de desecho) fue descrito en 1806 por el químico británico Humphry Davy. El primer prototipo se remonta a 1839. Desde entonces, la NASA ha demostrado el potencial de tales dispositivos en las misiones Gemini y Apolo. Sin embargo, el horizonte para la comercialización de la técnica no cesa de aplazarse una y otra vez.

De un lado, el mayor rendimiento que muestran las pilas de combustible actuales se ha logrado a expensas de incrementar su coste. De otro, el hidrógeno no existe como tal en la naturaleza, por lo que se requiere fabricarlo, almacenarlo y distribuirlo a gran escala con total seguridad y a precios razonables. Por ello, a fin de lograr una economía del hidrógeno competitiva, hoy se investigan varios métodos que persiguen optimizar cada una de las etapas. Así ocurre con uno de los elementos más caros del proceso: el catalizador que debe aumentar la potencia y el rendimiento de las pilas de combustible. En la actualidad, dichos dispositivos se fabrican con metales nobles, como el platino, pero de aquí a unos años quizá veamos catalizadores más económicos inspirados en los procesos que tienen lugar en ciertos microorganismos. De igual modo, los sistemas sólidos para el almacenamiento del hidrógeno, mucho más seguros que las bombonas y más compactos, se encuentran asimismo en vías

EN SÍNTESIS

A diferencia del petróleo, el hidrógeno no se obtiene como tal de la naturaleza. Debe ser generado, lo que conlleva un aporte de energía.

Una opción consiste en generarlo mediante los excedentes de energía producidos por las centrales solares o eólicas.

Existen varios dispositivos que posibilitan su producción y almacenamiento, pero ninguno concilia el bajo coste, la compacidad y la durabilidad.

Para mejorarlos, la investigación actual se inspira en ciertos procesos enzimáticos. También se consideran medios sólidos de almacenamiento.

NGKAKI/ISTOCKPHOTO

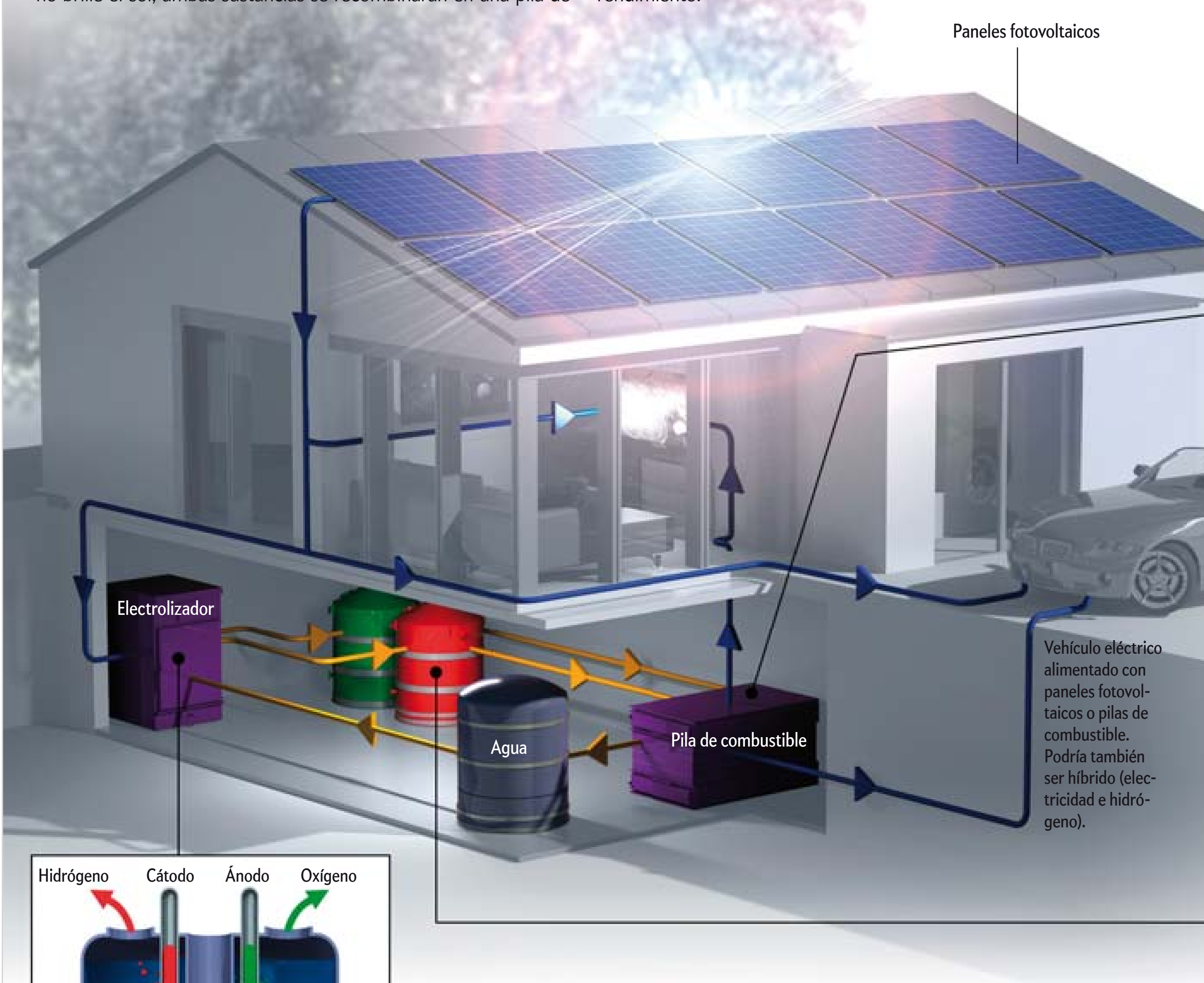


Hacia una economía del hidrógeno

En las viviendas del futuro, la electricidad generada por paneles fotovoltaicos se aprovechará en electrodomésticos y vehículos. Los excedentes de producción se canalizarán hacia un electrolizador, donde el agua se disociará en hidrógeno y oxígeno molecular. Esta reacción convierte energía eléctrica en energía de enlace de la molécula de hidrógeno.

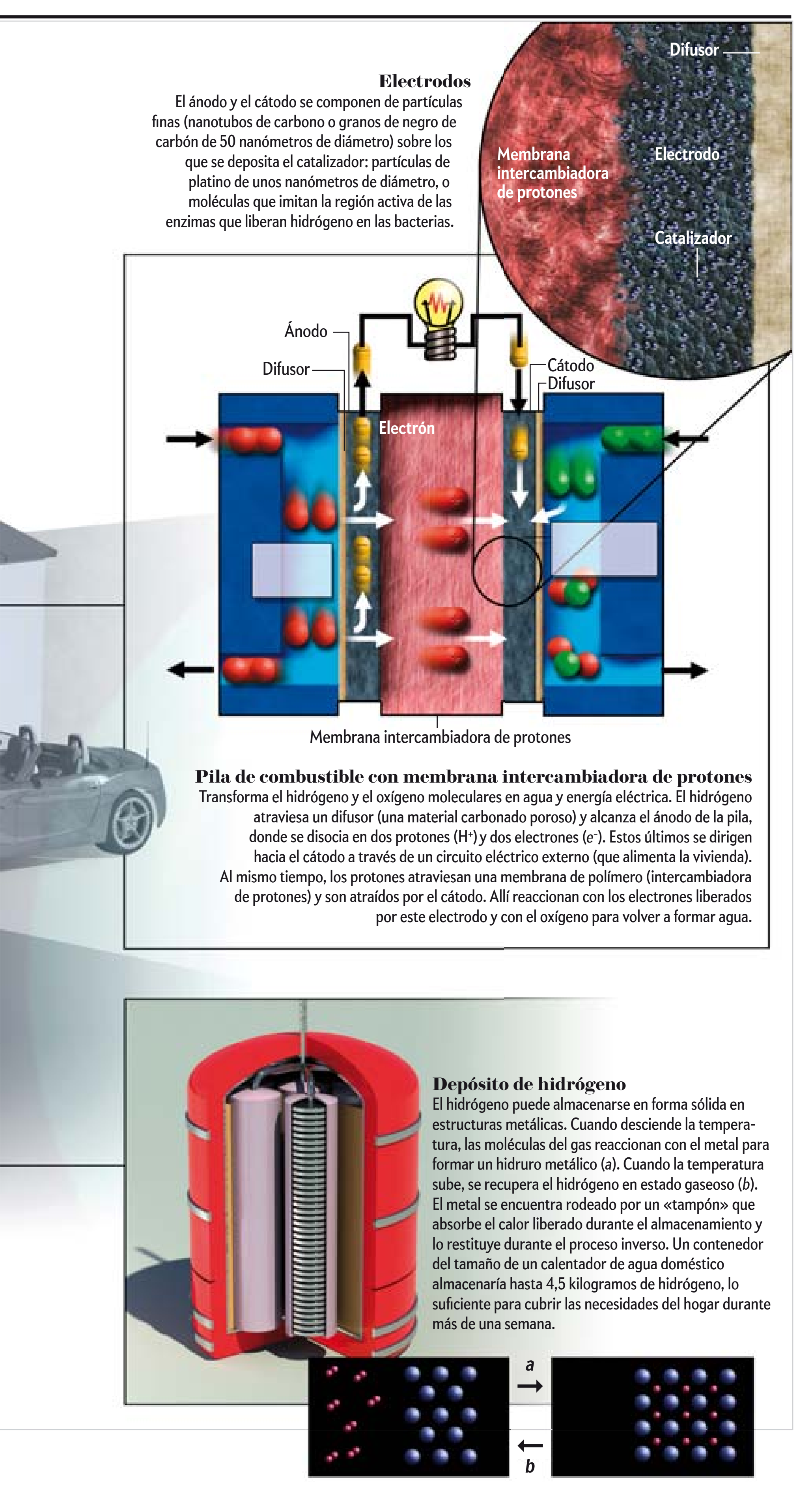
Los gases se almacenarán en sus respectivos depósitos. El hidrógeno podrá acumularse en forma sólida (en compuestos metálicos), una opción más compacta que el almacenamiento gaseoso. Cuando no brille el sol, ambas sustancias se recombinarán en una pila de combustible, donde se transformarán en agua y liberarán la energía previamente depositada en la molécula de hidrógeno.

En los electrodos, un catalizador (basado en un metal común y económico) facilitará la reacción y aumentará su rendimiento. El proceso, basado en la conversión, almacenamiento y redistribución de energía procedentes de fuentes renovables, no emite dióxido de carbono. Los expertos investigan cómo eliminar las emisiones de toda la cadena de producción, de la fabricación de los paneles fotovoltaicos a la del catalizador, y mejorar su coste y su rendimiento.



Electrolizador
Produce hidrógeno y oxígeno gaseosos a partir de agua y energía eléctrica, proporcionada en este caso por paneles fotovoltaicos. En un electrolizador alcalino (*izquierda*) se aplica una tensión de entre 1,5 y 2 voltios (un sistema ideal se bastaría con 1,23 voltios) entre dos electrodos, uno de níquel y otro de acero niquelado, sumergidos en una solución muy básica con una concentración elevada de hidróxido de potasio. En uno de ellos se genera hidrógeno (*rojo*) y en el otro, oxígeno (*verde*), ambos en estado molecular. Otra posibilidad consiste en integrar el electrolizador y la pila de combustible en un único dispositivo (una pila de combustible reversible o de membrana intercambiadora de protones), el cual emplearía la electricidad para generar hidrógeno, y viceversa, de acuerdo con las necesidades.

DIDIER FLORENTZ



Electrodos
El ánodo y el cátodo se componen de partículas finas (nanotubos de carbono o granos de negro de carbón de 50 nanómetros de diámetro) sobre los que se deposita el catalizador: partículas de platino de unos nanómetros de diámetro, o moléculas que imitan la región activa de las enzimas que liberan hidrógeno en las bacterias.

Pila de combustible con membrana intercambiadora de protones
Transforma el hidrógeno y el oxígeno moleculares en agua y energía eléctrica. El hidrógeno atraviesa un difusor (una material carbonado poroso) y alcanza el ánodo de la pila, donde se disocia en dos protones (H^+) y dos electrones (e^-). Estos últimos se dirigen hacia el cátodo a través de un circuito eléctrico externo (que alimenta la vivienda). Al mismo tiempo, los protones atraviesan una membrana de polímero (intercambiadora de protones) y son atraídos por el cátodo. Allí reaccionan con los electrones liberados por este electrodo y con el oxígeno para volver a formar agua.

Depósito de hidrógeno
El hidrógeno puede almacenarse en forma sólida en estructuras metálicas. Cuando desciende la temperatura, las moléculas del gas reaccionan con el metal para formar un hidruro metálico (*a*). Cuando la temperatura sube, se recupera el hidrógeno en estado gaseoso (*b*). El metal se encuentra rodeado por un «tampón» que absorbe el calor liberado durante el almacenamiento y lo restituye durante el proceso inverso. Un contenedor del tamaño de un calentador de agua doméstico almacenaría hasta 4,5 kilogramos de hidrógeno, lo suficiente para cubrir las necesidades del hogar durante más de una semana.

de comercialización. A continuación examinaremos el potencial de la economía del hidrógeno, sus métodos de producción y de almacenamiento, y varias opciones para reducir los costes asociados a su implantación.

Las razones que nos llevan a considerar el hidrógeno como una opción energética son varias. En primer lugar, posee una elevada capacidad energética. En estado gaseoso se encuentra en forma de molécula (dos átomos de hidrógeno unidos entre sí). La ruptura de ese enlace —por ejemplo, al reaccionar con el oxígeno del aire— libera grandes cantidades de energía, la cual puede convertirse en electricidad con una pila de combustible. Por otro lado, el único desecho de la reacción es agua, lo que convierte al hidrógeno en una alternativa no contaminante a los combustibles fósiles.

ALMACÉN DE RENOVABLES

El hidrógeno puede obtenerse a partir de una materia prima muy abundante: el agua. Así, todo el proceso se apoya en dos reacciones químicas que no emiten gases de efecto invernadero. En la electrólisis, el agua se descompone en oxígeno e hidrógeno gaseosos por acción de la electricidad. Por medio del proceso inverso, los mismos gases se hacen reaccionar para generar agua, calor y electricidad. El balance de materia de estas dos reacciones es nulo, pues el agua empleada en el proceso se recupera al final de este. El hidrógeno solo se emplea a modo de almacén temporal de energía. Su estabilidad ofrece la posibilidad de reservarlo y aprovecharlo en función de la demanda, con un buen rendimiento neto.

El método se antoja especialmente adecuado para hacer acopio de los excedentes de electricidad que a menudo generan las fuentes renovables. En particular, la producción solar y eólica presentan un carácter intermitente y poco previsible, debido a su dependencia de las condiciones meteorológicas. En ocasiones, ello desemboca en la generación de más energía que la que la red puede absorber. El almacenamiento de esos excedentes en forma de hidrógeno permitiría aprovecharlos más tarde, con un suministro uniforme y una distribución regular. En la isla de Utsira, a 18 kilómetros de la costa noruega, los hogares se alimentan de la electricidad procedente de una central eólica. Cuando se generan excedentes,

estos se emplean para electrolizar el agua y producir hidrógeno, que se almacena allí mismo. Cuando el viento amaina, el gas se combina con el oxígeno del aire en una pila de combustible y se reconvierte en energía eléctrica. Gracias a este sistema, una decena de viviendas se abastecen solo con energía renovable. En la actualidad se están poniendo en marcha proyectos similares en Córcega y en la isla de la Reunión, con el objetivo de suministrar electricidad de origen fotovoltaico a lugares aislados.

La meta, por tanto, consiste en construir dispositivos fiables para la producción y uso de hidrógeno, en gran cantidad y a precios razonables. Este objetivo, no obstante, aún se presume lejano. Si bien ya existen varias técnicas que permiten llevar a cabo el proceso, ninguna de ellas conjuga el bajo coste, la compacidad y la durabilidad de los dispositivos. En ello radica la apuesta de la investigación actual sobre el hidrógeno.

CONSUMO DOMÉSTICO

¿Cuánto gasta una familia?

Para entender la importancia del hidrógeno como medio duradero de almacenamiento y distribución de energías renovables, consideremos un caso sencillo. El consumo medio de una familia francesa asciende a entre 2500 y 3100 kilovatios hora al año (sin incluir la calefacción, lo cual puede llegar a triplicar la cifra). La combustión del hidrógeno molecular libera 33 kilovatios hora por kilogramo, por lo que con un sistema de pilas de combustible de 5 kilovatios y un rendimiento del 50 por ciento bastaría con producir unos 500 gramos de hidrógeno molecular al día para asegurar las necesidades energéticas de una familia media. (Un litro de agua contiene unos 110 gramos de hidrógeno.) Un electrolizador que consumiese unos 54 kilovatios hora de electricidad por kilogramo de hidrógeno producido necesitaría un mínimo de 27 kilovatios hora procedentes de paneles solares.

Teniendo en cuenta las variaciones cotidianas y estacionales de insolación en la Francia metropolitana, sería necesario instalar un sistema de 8 kilovatios pico, con una generación de electricidad equivalente a unos 55 metros cuadrados de los actuales paneles solares en silicio policristalino. Por supuesto, con una demanda energética menor (con bombillas de bajo consumo, electrodomésticos provistos de sistemas de ahorro energético, cambios en los hábitos cotidianos, etcétera) las superficies necesarias disminuirían otro tanto, y todo ello sin tener en cuenta que el calor producido por la electrólisis y el funcionamiento de la pila de combustible podría aprovecharse para calentar el agua y la vivienda.

Hoy se estima que, para amortizar la inversión inicial y cubrir los costes de mantenimiento, el precio de producción del hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables e intermitentes (eólica, fotovoltaica) puede variar entre los 4 y los 20 euros por kilogramo, o entre 2 y 10 euros diarios para cubrir las necesidades de una familia media francesa, sin contar la calefacción. La cifra debe compararse con el precio del suministro eléctrico obtenido exclusivamente de la red, que puede estimarse en torno a un euro al día. El ejemplo ilustra con claridad el interés de la investigación actual por reducir el coste de estos dispositivos.

PRODUCCIÓN POR ELECTRÓLISIS

La primera etapa consiste en la producción del gas. Además de mediante la electrólisis del agua, el hidrógeno puede generarse a partir de biomasa, si bien esta técnica se encuentra aún en vías de perfeccionamiento. En general, un electrolizador es un sistema que convierte la electricidad en energía química. Los hay de varios tipos. Hoy por hoy, la electrólisis alcalina del agua es, sin duda, la más barata y desarrollada. Su principal ventaja reside en que los electrolizadores se fabrican con materiales comunes y económicos. Constan de dos simples electrodos de acero o níquel sumergidos en una solución muy básica (el electrolito). Cuando por ellos circula una corriente eléctrica, se producen el hidrógeno y el oxígeno gaseosos.

Concebida desde hace años para la producción de hidrógeno a escala industrial, la electrólisis alcalina ha demostrado su eficacia. La principal limitación de los dispositivos actuales, además de su gran volumen, reside en su sensibilidad a las variaciones bruscas de corriente. La mayor parte de los electrolizadores alcalinos industriales han de recibir una corriente mínima constante y evitar las paradas frecuentes, lo cual supone un claro inconveniente a la hora de emplearlos como almacenes de los excedentes de la producción con renovables, irregulares por naturaleza. Por tanto, la técnica parece mejor adaptada a los excedentes nocturnos de las centrales nucleares que a aquellos asociados a las energías renovables.

En ese contexto, más prometedora se presenta la electrólisis a alta temperatura (entre 750 y 800 grados Celsius), también en desarrollo. Esta técnica se basa en utilizar el calor disipado por una fuente externa (como el que se genera en torno a las torres de refrigeración) para activar la reacción de electrólisis y alcanzar rendimientos de conversión elevados. Con todo, la opción más práctica parecen aportarla los electrolizadores de membrana de intercambio de protones. En ellos, el electrolito se sustituye por una membrana de polímero muy delgada (de entre 100 y 200 micrómetros, el espesor de un cabello), impermeable al gas y aislante a los electrones, pero capaz de conducir los protones desde el ánodo, donde se producen, hasta el cátodo. Pueden operar entre la temperatura ambiente y unos 80 grados Celsius, con suministro de agua pura y en un amplio intervalo de corrientes, de hasta cuatro amperios por centímetro cuadrado. Son compactos y muestran una gran flexibilidad ante las variaciones de corriente.

En el modo de funcionamiento inverso, los tres procedimientos mencionados (alcalinos, de alta temperatura y de membrana de intercambio de protones) pueden también aplicarse en las pilas de combustible, que convierten la energía contenida en el hidrógeno en energía eléctrica. Las primeras pilas de combustible fueron de tipo alcalino. Se desarrollaron en la década de los sesenta con miras a las aplicaciones espaciales en el marco de los programas Gemini, Apolo y Soyuz. Aunque económicos, estos dispositivos se ven perjudicados por el dióxido de carbono atmosférico (que perturba su funcionamiento al reaccionar con el hidróxido potásico del electrolito) y necesitan la aportación de oxígeno purificado.

Por todo lo anterior, en los últimos años la investigación se ha centrado en las pilas de combustible de membranas intercambiadoras de protones. Estos dispositivos ofrecen potencias en un amplio intervalo (desde 0,1 vatios a 100 kilovatios) y rendimientos de conversión eléctrica de entre el 50 y el 70 por ciento. Ya han encontrado usos comerciales en la generación autónoma de electricidad, en entornos aislados o en algunas aplicaciones electrónicas móviles. La mayoría de los fabricantes de



STATOIL, ASA

En la isla noruega de Utsira, **la electricidad que abastece a los hogares procede de dos centrales eólicas. Los excedentes se almacenan en forma de hidrógeno molecular no lejos de los aerogeneradores. Cuando no sopla el viento, se reconvierten en electricidad.**

automóviles las han considerado para el desarrollo de vehículos de hidrógeno.

PILAS REVERSIBLES

Por tanto, los sistemas de membranas intercambiadoras de protones se encuentran entre los dispositivos más prometedores, tanto en lo que se refiere a la producción de hidrógeno por electrólisis como para su conversión en electricidad en una pila de combustible. Por otro lado, ambas funciones pueden combinarse en un mismo aparato: la pila de combustible reversible. Esta, acoplada a un sistema de almacenaje, produce hidrógeno cuando se generan excedentes de electricidad y, más tarde, restituye esa energía. Estos dispositivos se muestran aptos para usos domésticos, pues ocupan un volumen reducido y requieren poco mantenimiento. El principal obstáculo para su uso generalizado continúa siendo el coste de los materiales necesarios (membrana y catalizador).

Los electrodos de las pilas de membrana intercambiadora de protones han de fabricarse con metales nobles. Operan en un medio ácido, por lo que los metales como el hierro, el cobalto o el níquel se oxidarían y se disolverían con rapidez. Sin embargo, debido a la temperatura a la que deben operar, requieren también catalizadores: moléculas que rebajen la barrera energética que debe superarse para que la reacción tenga lugar. Por lo general se emplean metales nobles como platino, paladio o iridio, pero estos resultan escasos y extremadamente caros (el precio de un kilogramo de platino asciende a 40.000 euros), si bien hasta ahora han sido empleados en los catalizadores para automóviles.

Una pila de combustible destinada a alimentar el motor de un vehículo eléctrico de tamaño medio contiene entre 20 y 30 gramos de platino, lo cual supone más del 20 por ciento del coste total de una pila producida en serie. Por otro lado, equipar con platino todos los automóviles del mundo resultaría imposible. La cantidad de platino disponible en el planeta se estima en unas 30.000 toneladas, de las cuales se extraen unas 200 al año. Con ello podrían fabricarse pilas de combustible para unos 10 millones de vehículos: una pequeña fracción de los más de 700 millones que se calcula que ruedan sobre el globo. Con los medios actuales, cerca de un tercio de los recursos totales de platino deberían destinarse al parque automovilístico, y ello sin contar con las pérdidas debidas a un reciclaje incompleto: hoy en día, de todo el platino empleado en una pila de combustible apenas se recupera el 50 por ciento.

Superar esa dificultad implica disminuir la cantidad de metales nobles necesaria. Hoy se persigue el objetivo de reducir la cantidad de platino en un factor diez (hasta dos o tres gramos por pila), lo que equivaldría a unos 0,1 gramos de platino por kilovatio de potencia eléctrica generada. Ello debería lograrse sin merma de las prestaciones ni del período de vida útil del dispositivo. A tal fin, se investigan varias posibilidades. Una de ellas consiste en mejorar la disposición del catalizador en el seno de la capa reactiva: en otras palabras, no emplear más platino del estrictamente imprescindible. Los avances en nanotecnología han posibilitado la síntesis de partículas de platino calibradas a escala nanométrica y, de esta manera, optimizar la superficie de reacción y la actividad catalítica. Sin embargo, el objetivo de 0,1 gramos de platino por kilovatio parece difícil de alcanzar solo con platino.

Una segunda opción intenta mejorar las propiedades intrínsecas de los catalizadores. Gracias al uso de aleaciones de platino y metales de transición menos onerosos (níquel, cobalto, manganeso, hierro...) en el seno de las nanopartículas, se han obtenido catalizadores con prestaciones superiores a las de aquellos compuestos solo de platino. Por último, la cantidad de metales nobles necesarios podría rebajarse si las pilas de combustible funcionasen a temperaturas mayores (unos 150 grados Celsius, en lugar de los 80 grados actuales), lo cual limitaría la contaminación con ciertas impurezas (CO, NO_x,

SO_2, H_2S, NH_3...) presentes en los reactivos (aire e hidrógeno). Ello requiere, sin embargo, desarrollar nuevas membranas intercambiadoras de protones.

INSPIRARSE EN LA NATURALEZA

Las tres posibilidades mencionadas se investigan en paralelo. Por otro lado, los avances logrados durante los últimos cinco años en la modelización de numerosos organismos han aportado una nueva vía de estudio que ha permitido alcanzar, en el laboratorio, cantidades cercanas a los 0,25 gramos de platino por kilovatio. Al respecto, cabe destacar la labor realizada en el Laboratorio de Innovación para la Tecnología en Nuevas Energías y Nanomateriales (LITEN) de Grenoble.

Ciertos microorganismos han desarrollado sistemas enzimáticos que, aunque solo se basan en metales comunes, catalizan las mismas reacciones que tienen lugar en los electrolizadores o en las pilas de combustible. Para transformar agua en hidrógeno o llevar a cabo el proceso inverso, las hidrogenasas de numerosas bacterias y microalgas emplean níquel o hierro. Por tanto, estas enzimas constituyen una valiosa fuente de inspiración a la hora de concebir nuevos catalizadores. El objetivo consiste en reproducir algunas de las propiedades estructurales y funcionales que caracterizan a las regiones activas de estas enzimas.

Esa línea de investigación, conocida como química inspirada en la biología, ha sido puesto en marcha con éxito por el equipo de dos de los autores (Fontecave y Artero) en el Laboratorio de Química y Biología de los Metales de Grenoble. En colaboración con Serge Palacin y Bruno Jouselme, del Laboratorio de Química de Superficies e Interfaces de Saclay, y gracias al concurso de la nanotecnología, hace un tiempo se elaboró el primer material carente de metales nobles capaz de catalizar la producción de hidrógeno a partir del agua (en los electrolizadores) y, con igual eficiencia, su oxidación (en las pilas de combustible).

Dicho material se basa en el funcionamiento de las hidrogenasas. En él, un átomo de níquel se fija en el interior de cierta molécula que, a su vez, se introduce en nanotubos de carbono, caracterizados por una presentar una gran superficie y una buena conductividad eléctrica. El material resultante se ha revelado estable y capaz de funcionar de forma reversible en medio ácido, una cualidad que lo hace compatible con las técnicas de membranas intercambiadoras de protones. Hasta ahora, el platino era el único elemento conocido con estas propiedades. Las densidades de corriente obtenidas todavía son bajas (entre 100 y 1000 veces menores que las que se logran con platino), pero su elaboración resulta más económica. A pesar de que aún restan numerosas etapas por cubrir hasta conseguir un catalizador que pueda rivalizar con los basados en platino, el nuevo material presenta otras ventajas, como una buena tolerancia al monóxido de carbono que, con frecuencia, contamina el hidrógeno (especialmente el que se obtiene a partir de biomasa).

La biología ha servido de modelo para la creación de nuevos materiales para membranas intercambiadoras de protones. Hoy estas membranas se fabrican sobre todo a partir de un polímero perfluorado sulfonado (el más conocido es el Nafion, comercializado desde los años sesenta del siglo xx por la empresa DuPont). No obstante, la presencia de flúor en su composición encarece la producción y exige un reciclaje eficaz. El transporte de protones a través de las membranas constituye un proceso fundamental en la respiración de los organismos. Al perforar de canales a través de una membrana y la fijar aminoácidos sobre sus paredes, Thomas Berthelot, del Comisariado de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) de Saclay, y sus colaboradores han reproducido la estructura de las bombas de protones de la membrana de las mitocondrias (los orgánulos encargados de la respiración celular). El material resultante puede competir con el Nafion, con la ventaja de que presenta menos sensibilidad a la desecación y una mayor estabilidad mecánica.

ALMACENAMIENTO

Otro obstáculo lo plantea el almacenamiento del gas. El hidrógeno es el menos denso de todos los gases. La licuefacción (a 253 grados Celsius bajo cero, a presión atmosférica) no se considera una alternativa, ya que el proceso consume casi la mitad de la energía química acumulada en la molécula de hidrógeno. Además, el hidrógeno líquido se evaporaría con facilidad debido a las pérdidas térmicas del recipiente.

Una opción consiste en almacenar el hidrógeno gaseoso a altas presiones. Para las aplicaciones relacionadas con el transporte se proponen contenedores que lo mantengan a entre 350 y 700 atmósferas. Estos, además de eficaces y seguros, deberían soportar unas 5000 recargas y no ser metálicos, ya que el hidrógeno se difunde con facilidad a través de la mayoría de las paredes metálicas, lo que acaba debilitándolas a medio plazo. A fin de confeccionar un depósito de automóvil con capacidad para 4,2 kilogramos de hidrógeno, la solución propuesta por los equipos del CEA consiste en el moldeo rotacional de un material plástico compuesto. Al ser de una sola pieza, aumenta la resistencia del plástico, que además es impermeable al hidrógeno. Este tipo de contenedor se encuentra en fase de estudio por parte de la compañía Air Liquide.

Otra posibilidad consiste en aprovechar la capacidad de la molécula de hidrógeno para insertarse en estructuras metálicas y formar hidruros. Esta forma de almacenamiento sólido está siendo desarrollada por la empresa McPhy-Energy a partir de los resultados obtenidos por el equipo de uno de los autores (Fruchart) en el Instituto Neel del CNRS en Grenoble. Un ma-

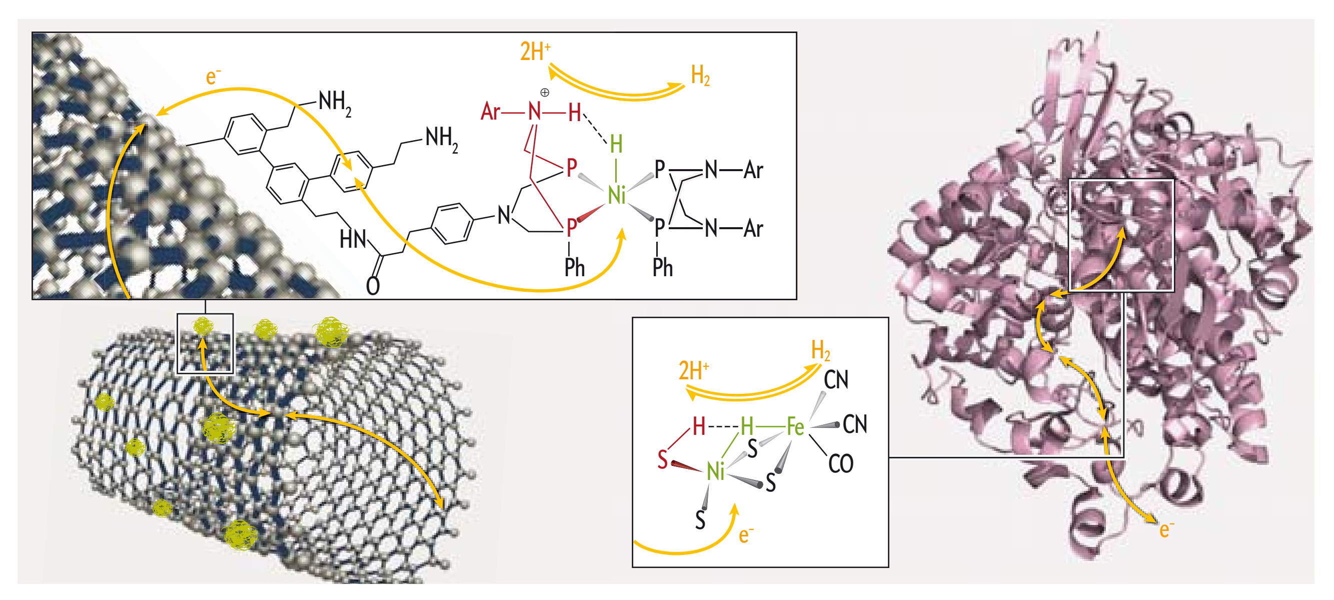
BIOMÍMESIS

Fotosíntesis artificial

¿Podría un sistema captar luz y transformarla en hidrógeno? En ello se afanan los expertos. A través de la fotosíntesis, los organismos vivos utilizan la energía solar para producir biomasa, fijando en el proceso el dióxido de carbono. A partir de agua y luz, ciertas algas y bacterias fotosintéticas producen también hidrógeno.

Los investigadores intentan remedar el proceso acoplando los catalizadores del electrolizador (que producen hidrógeno y oxígeno) a un fotosensibilizador que absorbe la luz solar y libera electrones. En este dispositivo, los electrones se transfieren directamente desde el fotosensibilizador hacia los catalizadores.

Aunque la técnica se encuentra en fase de investigación fundamental, podría competir con el acoplamiento de la electrólisis a una fuente fotovoltaica. Por un lado, debido a lo compacto y simple de los dispositivos; por otro, porque ofrecería una alternativa barata a los materiales usados en las células fotovoltaicas y los electrolizadores de membranas intercambiadoras de protones.



El catalizador de níquel (*izquierda*) concebido en el Comisariado de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) por uno de los autores (Artero) y sus colaboradores se inspira en las hidrogenasas, enzimas que transforman el agua en hidrógeno molecular, y viceversa, en bacterias y microalgas (*derecha*). En la enzima, unos agregados metálicos (*no representados*) guían los electrones (e^-) hacia el emplazamiento catalítico (*verde*), constituido por un átomo de níquel (Ni) y uno de hierro (Fe), donde tiene lugar la conversión de agua en hidrógeno. El catalizador sintético se ha fijado a un nanotubo de carbono. Guiados por el nanotubo y la molécula de enlace, los electrones alcanzan el emplazamiento catalítico, constituido por níquel.

POUR LA SCIENCE

terial con un elevado contenido en magnesio se sumerge en hidrógeno y se somete a presiones de 10^6 pascales (unas diez veces la presión atmosférica), lo que da lugar a hidruro de magnesio. Este procedimiento permite que el material absorba más de un seis por ciento de su masa en hidrógeno, el cual se libera cuando la presión baja de $2 \cdot 10^5$ pascales.

Algunos depósitos contienen un material de cambio de fase que absorbe el calor desprendido durante el almacenamiento y lo restituye durante la recuperación, lo que favorece este último proceso. Si se unen varios depósitos con el material de cambio de fase en el interior de un contenedor tradicional de transporte de mercancías (con un volumen de unos 37 metros cúbicos), se almacena el equivalente a 70 kilogramos de hidrógeno gaseoso (2,3 megavatios hora) en forma de hidruro sólido (MgH_2). El rendimiento del proceso de recuperación de la energía supera el 95 por ciento. Una unidad del mismo tamaño sin material de cambio de fase almacena hasta 700 kilogramos de hidrógeno, aunque con una eficiencia del 60 por ciento. Además de resultar muy seguros y aguantar varios miles de ciclos, tales depósitos gozan de la flexibilidad que exige el almacenamiento de energías renovables, pues operan con cualquier cantidad de hidrógeno y liberan la energía a conveniencia. Además, se adaptan a las necesidades domésticas y a las de una estación de servicio que funcione de manera autónoma gracias a colectores solares o eólicos.

Debido a la masa de hidruro metálico y a las temperaturas requeridas, le técnica aún no puede emplearse en vehículos. No obstante, las prestaciones de ciertos hidruros ligeros dejan entrever la posibilidad de coches híbridos que combinen un motor térmico y una pila de combustible, lo que aumentaría su autonomía. Algunos hidruros de titanio, vanadio o cromo, dispuestos en un depósito híbrido en el que el hidrógeno se almacene a la vez en forma sólida y a presiones de unos 300 bares, pueden funcionar a temperatura ambiente. En ello se basa una de las opciones consideradas por Toyota, la cual está siendo estudiada en Grenoble por el LITEN, el Instituto Néel y otras instituciones. Para una masa y un volumen de depósito compatibles con los de un vehículo actual, asegura una autonomía de 600 kilómetros. Ello duplicaría el rendimiento energético, con un coste inferior al de las baterías de litio usadas hoy en los automóviles eléctricos. También la recarga sería más rápida: llenar el depósito de hidrógeno no duraría más que algunos segundos. El precio del material compuesto necesario para el almacenamiento, sin embargo, resulta aún excesivo.

REPARTO DE TAREAS

A excepción de la producción hidroeléctrica, ya saturada, hoy ninguna fuente de energía renovable puede competir en términos de coste de producción con los combustibles fósiles ni con la energía nuclear. El aumento del precio de los primeros o las tasas a las emisiones de carbono tal vez modifiquen este panorama a medio plazo. En la actualidad, el desarrollo de un modelo energético que dé cabida a las renovables necesita incentivos económicos, como subvenciones, exenciones de impuestos para equipar la vivienda con paneles fotovoltaicos, etcétera.

Las técnicas que combinan fuentes renovables y almacenamiento de hidrógeno se desarrollan en mercados modestos, como la producción y almacenamiento de energía en entornos aislados o aplicaciones autónomas móviles (utilizadas en expediciones o en la navegación recreativa, por ejemplo). Pero el problema del almacenamiento de las energías alternativas se planteará con rapidez a gran escala. La generación solar o la eólica cubren una fracción de la demanda cada vez mayor. Sin una regulación con sistemas de almacenamiento adecuados, pronto será imposible conciliar las necesidades de la red y la imprevisibilidad de estas fuentes. En ello radica el interés del hidrógeno.

El hidrógeno permite además una organización descentralizada, individualizada y autónoma de la generación y uso de la

OTRAS ALTERNATIVAS

Hidrógeno a partir de biomasa

Aunque la materia prima más abundante para la producción de hidrógeno por electrólisis es el agua, en la actualidad también se investiga la posibilidad de obtenerlo a partir de materia orgánica común. Hoy en día, el medio más económico para producir hidrógeno es a partir de gas natural (metano). Expuesto a vapor de agua a altas temperaturas, este gas libera su contenido en hidrógeno en forma de hidrógeno molecular. Sin embargo, el metano no constituye una fuente renovable y, además, el proceso descrito emite dióxido de carbono. Por ello se prefiere usar otras moléculas orgánicas, como las obtenidas a partir de biomasa. Esta opción se caracteriza por un balance neutro en emisiones de carbono, ya que la cantidad de CO_2 producida es la misma que la captada por las plantas durante la fotosíntesis. Se estima que podría contribuir a la producción renovable de hidrógeno y cubrir en torno al diez por ciento de las necesidades de energía primaria de un país como Francia.

El procedimiento más eficiente es la pirólisis a alta temperatura, que transforma la biomasa en gas con rendimientos de entre el 40 y el 50 por ciento, a temperaturas de 1200 o 1400 grados Celsius (o de 900 a 1000 grados en presencia de catalizadores específicos). En él se liberan hidrógeno molecular, metano y dióxido de carbono, pero también monóxido de carbono. Este último, además de tóxico, inhibe los catalizadores de las pilas de combustible de membranas intercambiadoras de protones, consideradas como uno de los dispositivos más prometedores a la hora de aprovechar el hidrógeno con fines domésticos o en el transporte. Por tanto, debería eliminarse de la mezcla producida. Como tal, esta podría emplearse en pilas de combustible de alta temperatura, menos sensibles a los gases contaminantes, o transformarse en combustible líquido.

Por otro lado se están estudiando procesos de asimilación de la biomasa por fermentación, en los cuales se obtiene hidrógeno a temperatura ambiente. También se proyecta utilizar determinados organismos fotosintéticos. La bacteria *Rhodobacter capsulatus*, por ejemplo, produce hidrógeno por fotofermentación de ciertos azúcares procedentes de los residuos de la industria agrícola o papelera. Sin embargo, aún debe mejorarse el rendimiento de la descomposición de la celulosa y la lignina (la parte leñosa de la planta), polímeros muy resistentes a la hidrólisis. Por último, quizás algún día quepa la posibilidad de cultivar algas que produzcan hidrógeno directamente por fotosíntesis, sin pasar por la producción de biomasa.

energía. Un mismo individuo actuaría como productor, consumidor y distribuidor de hidrógeno hacia sus vecinos más próximos. Este es el sistema que en 2002 propuso el economista estadounidense Jeremy Rifkin en su obra *La economía del hidrógeno: La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la tierra* (Paidós, 2008). Hoy la técnica ya permite usar el hidrógeno de forma segura y controlada. La producción doméstica evitaría la puesta en marcha de caras y pesadas infraestructuras de generación y transporte, al tiempo que limitaría las pérdidas energéticas derivadas de la distribución del gas y la electricidad.

El modelo energético industrial actual favorece una producción a gran escala en gigantescas centrales conectadas a una red de gaseoductos, con grandes extensiones de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores. En caso de concretarse, la transición hacia un sistema totalmente descentralizado solo podrá ser paulatina. Ya se observan algunos pasos en esa dirección. En California y Noruega, por ejemplo, existen pequeñas instalaciones de producción en las cercanías de las estaciones de servicio de algunas autopistas, aunque por ahora no se trata de más que de prototipos. Otras infraestructuras de producción descentralizada están comenzando a extenderse por Bélgica, Holanda y el norte de Francia. Su objetivo consiste en responder a la creciente demanda de hidrógeno por parte de la industria para el refinado de los hidrocarburos o la producción de abonos (el hidrógeno se usa en la fabricación de amoníaco, precursor del nitrato de amonio).

El camino será más laborioso en lo que respecta al transporte, si bien en los últimos años se han realizado varios progresos. Las pilas de combustible y los depósitos de hidrógeno, ya sea en forma comprimida o sólida, se integran hoy en automóviles de tamaño ordinario. Hace apenas unos años, en 2002, tales dispositivos ocupaban el maletero y las plazas traseras de un monovolumen. En lo que concierne a la seguridad de las distintas técnicas, los avances han sido enormes.

Si los vehículos eléctricos cuya comercialización se anuncia para dentro de poco operan con baterías, la opción del hidrógeno y la pila de combustible se popularizará con miras a aumentar su autonomía. El prototipo 307CC FiSyPAC, desarrollado por Peugeot en colaboración con el CEA, incorpora una batería de iones de litio de 13 kilovatios hora y una pila de combustible de 23 kilovatios, lo que asegura una autonomía de 500 kilómetros.

El hidrógeno aparece, por tanto, como un vector energético prometedor. Con una capacidad de 33,3 kilovatios hora por kilogramo, sobrepasa en varios órdenes de magnitud a la de los materiales que componen las mejores baterías de litio. También hemos de recordar que, al contrario de lo que sucede en la actualidad, el modelo energético del futuro no se apoyará en una sola técnica. En el abanico de soluciones energéticas posteriores al petróleo, el hidrógeno será una más. Su integración paulatina en el nuevo panorama ya puede apreciarse. Algunas aplicaciones, como el alumbrado o la circulación basadas en el hidrógeno, ya no se hallan fuera de nuestro alcance. Cabe esperar que los avances en investigación fundamental y en desarrollo lo conviertan en una opción energética ineludible a partir de 2050.

PARA SABER MÁS

L'hydrogène, carburant de demain? Monográfico de *L'Actualité Chimique*, diciembre de 2001.
Automoción por pilas de combustible. Steven Ashley en *Investigación y Ciencia* n.º 344, págs. 54-61, mayo de 2005.
From hydrogenases to noble metal-free catalytic nanomaterials for H_2 production and uptake. A. LeGoff et al. en *Science*, vol. 326, págs. 1384-1387, 2009.
Une analyse économique de la production d'hydrogène pour des usages transport à partir d'electricité éolienne. P. Menanteau et al. en *Revue de l'Énergie*, vol. 61, págs. 322-333, 2010.
L'hydrogène est-il incontournable? P. Lucchese en *Dossier Pour la Science* n.º 69, págs. 112-117, 2010.
L'hydrogène, carburant de l'après pétrole? Edouard Freund y Paul Lucchese (coords.) Ediciones Technip, 2012.

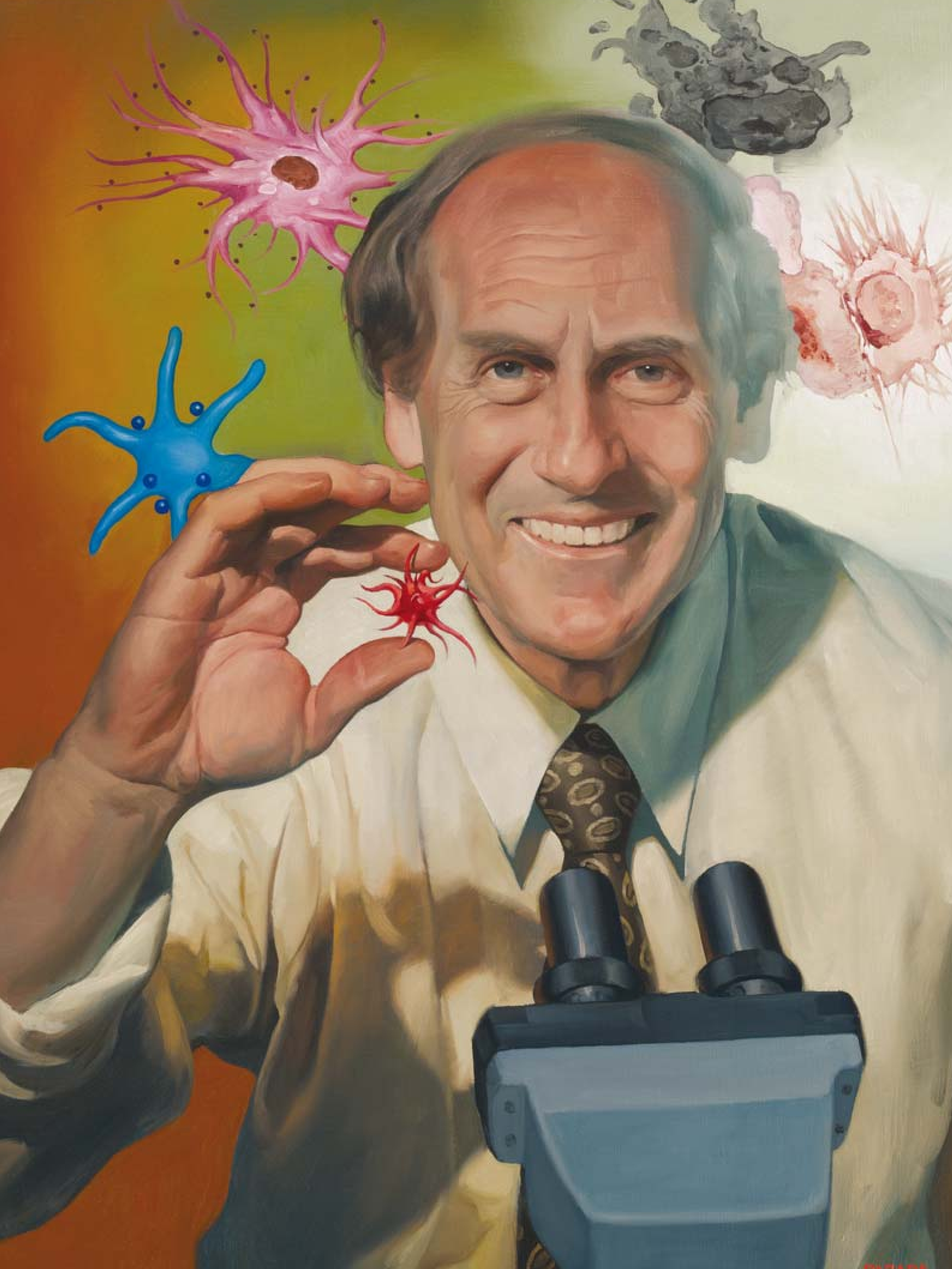
INMUNOLOGÍA

El científico paciente

Cuando Ralph M. Steinman desarrolló cáncer de páncreas, puso a prueba sus propias teorías acerca del cáncer y el sistema inmunitario. Con ellas sobrevivió más tiempo del esperado, pero tres días menos de lo necesario para saber que había ganado el premio Nobel

Katherine Harmon

ROBERTO PARADA



Un día, mientras escudriñaba una placa de células a través del microscopio, Ralph M. Steinman vio algo que nunca antes había visto nadie. Era a principios de la década de los setenta de siglo xx, cuando él investigaba en la Universidad Rockefeller, en la ciudad de Nueva York. En ese momento, los científicos seguían reconstruyendo los elementos básicos del sistema inmunitario. Habían averiguado que hay células B, leucocitos que ayudan a identificar a los invasores extraños, y células T, otro tipo de glóbulo blanco que ataca a estos invasores. Sin embargo, desconocían qué era lo que hacía que las células T y B se pusiesen a trabajar en primer lugar. Steinman vislumbró lo que pensó que podía ser la pieza que faltaba: unas células extrañas, con brazos largos y delgados, diferentes de las que había observado siempre.

Su intuición resultó ser correcta. Esas células dendríticas, como Steinman las denominó, se cree que desempeñan una función crucial en la detección de invasores y en el inicio de una respuesta inmunitaria contra ellos. Estas enganchan a los intrusos con sus brazos, los ingieren y los llevan hacia otros tipos de células del sistema inmunitario, «enseñándoles» lo que tienen que atacar. Fue un descubrimiento histórico, que explicaba con un nivel de detalle sin precedentes el funcionamiento de las vacunas y que catapultó a Steinman a los más altos escalafones de su profesión.

En muchos sentidos, la historia de Steinman es la típica: científico brillante realiza un gran descubrimiento que inspira a una nueva generación de investigadores. De hecho, su idea fue notable por sus implicaciones, tanto para la ciencia como para sí mismo.

Con los años Steinman llegó a creer que las células dendríticas eran un arma decisiva para hacer frente a algunas de las enfermedades más detestadas, desde el cáncer hasta el sida. Él y su red global de colaboradores parecían estar en el buen camino para demostrar que estaba en lo cierto, cuando la historia de Steinman sufrió un giro inesperado.

En 2007 se le diagnosticó un cáncer de páncreas, una enfermedad implacable que mata a cuatro de cada cinco pacientes en un año. Al final, las células que descubrió al inicio de su carrera, y los amigos que hizo por el camino, no solo le ayudarían a luchar contra el cáncer, sino que alargarían su vida el tiempo suficiente para permitirle ganar el Nobel. Murió en septiembre de 2011, tres días antes de que una luz parpadeante en su teléfono móvil alertase a su familia de que lo habían premiado.

UNA MENTE PREPARADA

Steinman no se adentró en la biología hasta que llegó como estudiante a la Universidad McGill. Sin embargo, enseguida le cautivó. Fue su fascinación por el mundo minúsculo de las células del sistema inmunitario lo que le llevaría al laboratorio de Zanvil A. Cohn en Rockefeller. Más tarde, en su despacho, Steinman exhibiría una cita del famoso microbiólogo y vacunólogo del siglo xix Louis Pasteur: «*Le hazard ne favorise que les esprits préparés*» («La suerte favorece solo a las mentes preparadas»). Según Sarah Schlesinger, colaboradora y vieja amiga de Steinman, «Ralph estaba sobradamente preparado, totalmente capacitado para hacer un descubrimiento. Dicho esto, él intuía que estas células eran importantes». Fue la intuición y la confianza en la observación lo que le permitió llevar a cabo su influyente descubrimiento y ganarse la admiración de los compañeros.

Después de que viese por primera vez las células dendríticas, Steinman pasó las siguientes dos décadas convenciendo de su importancia a la comunidad científica, definiendo cómo funcionaban y cómo podrían trabajar con ellas los investigadores. «*Luchó* —no hay otra palabra para ello— para convencer a la gente de que eran una entidad distinta», dice Schlesinger, que fue a trabajar al laboratorio de Steinman en 1977, cuando aún estaba en secundaria. Incluso entonces, dice, la gente del mismo laboratorio no estaba convencida de que tales células dendríticas existiesen, puesto que eran difíciles de aislar en grandes cantidades. En ese momento, Steinman seguía trabajando en bancada. Schlesinger recuerda estar sentada con él, ante un microscopio de dos cabezales, examinando las células. «Le encantaba mirarlas», recuerda. «Había una gran alegría en cada pequeño descubrimiento que hacía.»

Hacia 1980, Steinman, que se había formado como médico, empezó a buscar maneras en las que su descubrimiento de las células dendríticas pudiera aplicarse de una forma más directa para ayudar a la gente. Durante las siguientes décadas, conforme se fue aceptando la existencia de las células, su laboratorio amplió el foco de atención para incluir la investigación sobre vacunas basadas en células dendríticas para el VIH y la tuberculosis, y sobre el tratamiento del cáncer. En el caso de enfermedades como la gripe o la viruela, que ya podían prevenirse con vacunas, aquellos que sobreviven a la exposición natural, po-

EN SÍNTESIS

Ralph M. Steinman fue el primero en describir las células dendríticas, cuya función es clave en la respuesta inmunitaria. Las denominó así por sus ramificaciones arborescentes.

Las células dendríticas, que enseñan a otras células inmunitarias qué es lo que deben atacar, centran ahora el diseño de numerosas vacunas contra el cáncer y el VIH.

Cuando a Steinman se le diagnosticó cáncer de páncreas en 2007, él y sus colaboradores utilizaron estas vacunas en desarrollo para tratar la enfermedad.

Sus compañeros creen que las vacunas le ayudaron a prolongar su vida más allá de lo esperable. Murió justo tres días antes de ganar el premio Nobel.

dían desarrollar una inmunidad de por vida. El sida, la tuberculosis y el cáncer suponían un desafío mayor porque parecían superar mejor al sistema inmunitario. «Tenemos que ser más inteligentes que la naturaleza», diría Steinman, según Schlesinger. Es decir, ayudar a las células dendríticas, dándoles información más específica sobre el virus o el tumor frente al que el sistema inmunitario necesita organizar un ataque.

En la década de los noventa, en colaboración con Madhav Dhodapkar, ahora en la Universidad de Yale, y Nina Bhardwaj, de la Universidad de Nueva York, Steinman desarrolló un proceso para extraer las células dendríticas de la sangre y cebarlas con antígenos indicadores de infecciones, como la gripe y el tétanos, y luego retornarlas de nuevo al cuerpo para crear una inmunidad más fuerte. Esta técnica sirvió de base para una vacuna contra el cáncer de próstata llamada Provenge aprobada en EE.UU. en 2010 y que prolonga la vida de los pacientes en estado terminal —aunque solo sea durante unos meses.

EL EXPERIMENTO FINAL

A principios de 2007, Steinman se encontraba en una reunión científica en Colorado, un viaje que convirtió en unas vacaciones de esquí en familia, cuando él y sus hijas gemelas sufrieron lo que parecía una molestia estomacal. Ellas se recuperaron rápido; la enfermedad del padre, en cambio, se prolongó. Poco después de llegar a casa, desarrolló ictericia. Durante la tercera semana de marzo se sometió a una tomografía computarizada y los radiólogos encontraron un tumor en su páncreas. Para entonces, ya se había extendido a los ganglios linfáticos. Él sabía que sus posibilidades de sobrevivir eran escasas: el 80 por ciento de los pacientes con cáncer de páncreas mueren durante el primer año.

«La primera vez que nos lo contó, dijo, “No busquéis esto en Google, simplemente escuchadme”», recuerda su hija Alexis. «Insistió en que, aunque era una enfermedad muy drástica, se hallaba en una posición muy buena.» A diferencia de los pacientes comunes, Steinman tenía acceso a muchos de los mejores inmunólogos y oncólogos del mundo y, quizá más importante aún, a los tratamientos más prometedores.

Cuando Schlesinger escuchó la noticia, quedó destrozada. Rápidamente ofreció apoyo a su mentor. Ella, Steinman y su estrecho colaborador de Rockefeller, Michel Nussenzweig, empezaron a llamar por teléfono a todos sus colegas para comunicarles la noticia. Steinman estaba convencido de que el modo más seguro de curarse de cualquier tumor era desarrollar inmunidad frente al mismo a través de sus propias células dendríticas. Disponían de un tiempo limitado para demostrar que estaba en lo cierto.

Una de las primeras personas a quien Steinman telefoneó tras conocer el diagnóstico fue su viejo colaborador Jacques Banchereau, quien ahora dirige el Instituto Baylor de Investigación en Inmunología en Dallas. Después, Banchereau descolgó el teléfono para llamar a Anna Karolina Palucka, investigadora del Baylor, que conocía a Steinman desde los años noventa. Aunque ella estaba desarrollando una vacuna experimental que creía que podría ayudar a Steinman, se propuso «separar el amigo, el paciente y el científico».

Por su parte, Schlesinger llamó a Charles Nicolette, amigo y colaborador durante muchos años y director científico de Argos Therapautics, una empresa de fármacos basados en ARN ubicada en Durham (Carolina del Norte), que Steinman había cofundado. Nicolette movilizó a sus compañeros a los pocos minutos de colgar el teléfono.

CONCEPTOS BÁSICOS

Una dosis de su propia medicina

Diversos tratamientos experimentales que recibió Steinman contra el cáncer utilizaron las mismas células que él ayudó a descubrir y que le hicieron ganar el premio Nobel. El sistema inmunitario extermina células cancerosas constantemente. Pero cuando un número suficiente se escurre entre las defensas naturales, los tumores pueden afianzarse y engañar a las células inmunitarias para que las acepten como una parte normal del cuerpo. Si se entrena a las células dendríticas, que ayudan a iniciar la respuesta inmunitaria, para que reconozcan un tumor como un cuerpo extraño al que se debe atacar, podrían erradicar, potencialmente, las células malignas.

1 Las células dendríticas se extraen de la sangre de un paciente y se exponen directamente a una proteína de ese tipo de cáncer (antígeno, que provoca una respuesta inmunitaria) o material genético extraído del propio tumor del paciente (que a su vez genera un antígeno personalizado). Las células captan el material, tal y como lo hacen en el cuerpo cuando se encuentran con los patógenos y los absorben.

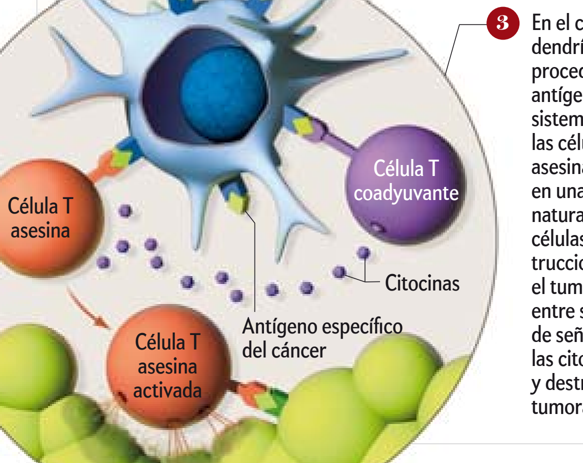
Célula dendrítica

Material genético del tumor

Antígeno del cáncer

2 Para preparar a las células dendríticas con la infusión del antígeno e iniciar una respuesta inmunitaria específica contra el tumor, se añaden compuestos estimulantes para incrementar el número de estas células y forzarlas a su estado maduro presentador de antígeno antes de inyectarlas de nuevo en el paciente.

Célula dendrítica madura



3 En el cuerpo, las células dendríticas programadas proceden a mostrar el antígeno a otras células del sistema inmunitario, como las células T coadyuvantes y asesinas, tal y como lo harían en una respuesta inmunitaria natural. Si todo va bien, las células T tomarán las instrucciones específicas para el tumor y se coordinarán entre sí, a través de proteínas de señalización del tipo de las citocinas, para buscar y destruir las células tumorales.

ASESOR: ERIC VON HOFE; ILUSTRACIÓN DE TAMI TOLPA

El grupo de Nicolette había desarrollado una vacuna de células dendríticas que se estaba ensayando (estudio clínico en fase II) para tratar el cáncer avanzado de riñón. El tratamiento de Argos se basa en reclutar células dendríticas del paciente para que hagan frente a un cáncer; para ello se exponen las células a material genético del tumor, lo que induce a las células T a organizar un ataque apropiado.

A Steinman se le programó una extirpación de una parte del páncreas la primera semana de abril de 2007, una cirugía denominada procedimiento de Whipple, que forma parte de un tratamiento más tradicional para su pronóstico. Nicolette necesitaría una muestra de ese tumor para elaborar la vacuna. Era necesario, por tanto, que la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) aprobara —en solo unos días— la incorporación de Steinman al ensayo. El permiso llegó justo a tiempo.

Con las células tumorales aseguradas y mientras se estaba gestando el tratamiento de Argos, un proceso que podría necesitar meses, Steinman inició otros tratamientos. Poco después de la cirugía, se sometió a la quimioterapia habitual basada en Gemcitibine; después, a finales del verano, se inscribió en un ensayo de GVAX, una vacuna basada en células dendríticas que se estaba ensayando para tratar el cáncer de páncreas. Codesarrollada por Elizabeth Jaffee, de la Universidad Johns Hopkins, y administrada en el Centro del Cáncer Dana-Farber/Harvard, utilizaba un antígeno tumoral genérico, al igual que la vacuna para el cáncer de próstata Provenge. En un ensayo previo en fase II, los pacientes con cáncer de páncreas que recibieron la vacuna vivieron un promedio de cuatro meses más que los que no la recibieron; algunos llegaron a vivir durante años. Así que durante dos meses, a partir del final del verano, Schlesinger viajaba con Steinman a Boston casi todas las semanas.

Pasó el otoño. Pese a todo, Steinman se mantenía con buena salud. En septiembre de 2007 recibió el premio Albert Lasker de Investigación Médica Básica, considerado por muchos la antesala del Nobel. En una serie de entrevistas en vídeo explicó con detalle la promesa de las células dendríticas para combatir el cáncer; señaló que un ataque del sistema inmunitario es un proceso muy dirigido, muy específico y, a diferencia de la quimioterapia, no tóxico. «Creo que esto abre nuevas vías para el desarrollo de un tipo de tratamiento completamente nuevo contra el cáncer», dijo. «Pero necesitamos investigación y paciencia para desentrañar las reglas, para descubrir los principios.»

En ocasiones, Steinman mostraba más paciencia que la que les hubiese gustado a sus compañeros. En un principio prefirió que se aplicara el tratamiento lentamente, de modo que su equipo pudiese supervisar la respuesta inmunitaria después de cada sesión antes de empezar con la siguiente. Pero finalmente, Schlesinger y Nussenzweig lo convencieron de que, simplemente, no tenía tiempo. Si moría, el experimento y la recogida de datos habrían terminado.

En noviembre de 2007 la vacuna de Argos, realizada mediante la infusión de células obtenidas de la sangre de Steinman con material genético extraído de su tumor, ya estaba lista. Steinman acababa de terminar un tratamiento de quimioterapia y se inscribió en el ensayo de carcinoma de células renales de Argos bajo un protocolo de estudio en un solo paciente.

A principios de 2008, Steinman siguió con la vacuna de Palucka, que estaba siendo desarrollada para el melanoma. Puesto que incorporaba una selección de péptidos específicos del tumor, ella sospechó que podría aprovecharse para dirigirla al cáncer de Steinman mediante el uso de péptidos procedentes de su tumor en lugar de antígenos del melanoma.

TRATAMIENTOS

Un gran (auto)experimento

Después de que se le diagnosticase el cáncer, Steinman recibió una avalancha de ofertas para intentar varios tratamientos experimentales. Tras evaluar los datos y discutir las opciones con sus colaboradores, decidió seguir varias inmunoterapias que se estaban evaluando en ensayos clínicos en los que participó en calidad de paciente especial, en lugar de inscribirse de acuerdo a los diseños originales de los experimentadores. Estas vacunas, algunas de las cuales se adaptaron a su cáncer particular, se intercalaron con sesiones de quimioterapia tradicional y experimental.

Verano y otoño de 2007
Vacuna GVAX de células dendríticas para el cáncer de páncreas desarrollada en la Universidad Johns Hopkins y administrada en el Centro del Cáncer Dana-Farber/Harvard.

Finales de 2007
Tratamiento con un inhibidor de la señalización intracelular en ensayos de Genentech para intentar contener la comunicación celular anormal que puede impulsar el crecimiento del tumor.

Invierno de 2007 hasta la primavera de 2008
Vacuna basada en las células dendríticas de Argos, en desarrollo para el cáncer de riñón.

2008 hasta 2010
Vacuna de células dendríticas para el melanoma desarrollada en la Universidad de Baylor.

Mediados de 2010
Estímulo de péptidos de la vacuna de Baylor en combinación con el Hiltonol, estimulante inmunitario experimental de Oncovir, que activa el sistema inmunitario, en parte, al promover la liberación de la molécula señalizadora interferón.

Invierno y verano de 2010
Ipilimumab, anticuerpo monoclonal (molécula diseñada para unirse a una diana específica) de Bristol-Myers Squibb, aprobado por la FDA para el tratamiento del melanoma.

De todas partes del mundo llegaron otras ofertas de tratamientos experimentales. Las décadas de trabajo colectivo de Steinman habían unido el campo; ahora, esa red de científicos se había volcado para ayudar a uno de los suyos. «La gente piensa en la ciencia como un proceso solitario. De hecho, se trata de un proceso extremadamente social», comenta Schlesinger. La «naturaleza social de nuestro trabajo propició la disposición de estos inmensos recursos intelectuales».

Además del tratamiento habitual, Steinman acabó inscrito (en calidad de paciente especial) en cuatro estudios clínicos en marcha de varias terapias contra el cáncer basadas en células dendríticas, la mayoría de los cuales ni siquiera se estaban ensayando para el cáncer de páncreas, junto con otras inmunoterapias experimentales y quimioterapias. Schlesinger, miembro de la Junta de Revisión Institucional del Rockefeller, coordinó el tratamiento de Steinman a través de todos los canales de la Junta y la FDA, asegurándose de que se siguieran los protocolos. También le administró personalmente a Steinman sus vacunas cada vez que ello podía hacerse en el Rockefeller.

Steinman realizó su propio gran experimento al igual que llevaba a cabo otros en el laboratorio: recopilando cuidadosamente todos los datos, valorando las pruebas y repartiendo instrucciones. Schlesinger conserva aún cadenas de correos electrónicos de la época. Guardaba fichas muy detalladas sobre el modo

en que su cuerpo estaba respondiendo al tratamiento. En 2008, durante el tiempo en el que siguió el tratamiento de Palucka, ella vino a visitarle a Nueva York. Después de que Schlesinger hubiese administrado a Steinman su dosis de la vacuna, los tres salieron a comer. Al terminar la comida, Steinman insistió en pasarse por el hotel donde se alojaba Palucka para poderles mostrar la roncha que se estaba desarrollando en su pierna alrededor del punto de inyección. «Estaba muy entusiasmado con ello», recuerda Schlesinger. «"Esas son las células T", dijo», indicando que su cuerpo estaba activando una respuesta inmunitaria frente a la vacuna, «"¡es fantástico!"».

La inflamación local mostraba que Steinman estaba reaccionando a la vacuna. Pero Palucka advierte que no podemos estar seguros de que fuesen las células T específicas del tumor las que se habían movilizado. Todas las vacunas funcionan a través de las células dendríticas, pero la diferencia con su tratamiento y los demás que intentó Steinman era que en lugar de dejar la exposición al azar, los investigadores manipularon las células dendríticas fuera del cuerpo para mejorar las probabilidades de entrenar a las células T para atacar al tumor. Cuando a Schlesinger no le era posible ver la prueba por sí misma, Steinman le enviaba muy excitado las descripciones de los puntos de la vacunación, con información acerca de la apariencia y el tamaño de los puntos e incluso de cómo sentía cada uno.

Su marcador tumoral, el nivel de una proteína que indica la progresión de un cáncer (que fluctuó durante el transcurso del tratamiento), se convirtió en un barómetro de su actitud. La segunda vez que el marcador disminuyó, envió un correo electrónico con el encabezamiento «Hemos repetido el experimento», cuyo júbilo era evidente para aquellos que conocían su alegría en un triunfo científico.

Pero la buena noticia que alegraba al Steinman paciente nunca era lo suficientemente buena para satisfacer al Steinman científico. El hecho de que su experimento en un solo paciente a duras penas fuese un experimento científico le frustró hasta el final. Con los tratamientos experimentales administrados tan cerca los unos de los otros, y entremezclados con la quimioterapia tradicional, era imposible saber lo que había hecho disminuir su biomarcador tumoral.

Con todo, Steinman generó algunos datos interesantes a lo largo del proceso. En uno de los ensayos de Palucka de seguimiento del sistema inmunitario, encontró que un ocho por ciento de las células T CD8 (células T asesinas) habían sido dirigidas específicamente hacia su tumor. Esto puede sonar a poco, dice Schlesinger, pero teniendo en cuenta todos los posibles agentes patógenos contra los cuales el cuerpo puede acometer un ataque, un ocho por ciento es una cifra notable. «Algo o una combinación de cosas le inmunizó», asegura.

FINAL INESPERADO

Steinman y su esposa viajaron a Italia en junio de 2011 para celebrar el 40 aniversario de su boda, apenas dos meses después de lo que él refería como su cuarto «Whippleversario», en honor a su cirugía de abril de 2007. Ya había superado por mucho la supervivencia media de una persona con su tipo de cáncer.

A mediados de septiembre de 2011 seguía trabajando en su laboratorio y se habían llevado a cabo los preparativos para que reiniciase el tratamiento con Argos. Pero entonces enfermó de neumonía. «Al entrar en el hospital, dijo "Creo que no saldré de aquí"» recuerda Alexis. Con todo, siguió revisando los datos del Rockefeller hasta el 24 de septiembre. El viernes, 30 de septiembre, murió a los 68 años de edad de insuficiencia respiratoria producida por la neumonía, de la que su cuerpo debilitado por el cáncer no pudo defenderse.

Su familia se enfrentó a la dura tarea de dar la noticia a todos sus amigos y compañeros. Pensaron en visitar su antiguo laboratorio, donde había estado trabajando hasta hacía muy poco, para comunicarlo el lunes 3 de octubre. Pero aquella mañana, antes de que nadie se hubiese levantado, llamó Estocolmo. La BlackBerry de Steinman, en silencio, se hallaba junto a su mujer. En medio del sueño matutino, miró la luz que parpadeaba indicando que tenía un mensaje nuevo. En ese preciso momento llegó un correo electrónico para Steinman: le habían concedido el Premio Nobel de medicina y fisiología de 2011. «Inmediatamente todos gritamos al unísono sorprendidos», dice Alexis. Su siguiente pensamiento fue, «Vamos a ir a despertar a papá».

Para el resto del mundo no parecía haber nada fuera de lugar en el anuncio del comité del Nobel (los artículos estaban escritos, se habían emitido las declaraciones sobre Steinman y los otros dos receptores, Bruce Beutler, del Instituto de Investigación Scripps, y Jules Hoffmann, del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia). La sorpresa llegó unas horas más tarde, cuando salió a la luz la noticia de la muerte de Steinman. Las reglas del premio establecen que no se puede conceder de forma póstuma, pero si un premiado fallece entre el anuncio en octubre y la ceremonia de entrega en diciembre, puede permanecer en la lista. Este extraño calendario sumió al comité en una deliberación que fue seguida muy de cerca. Por fin, al final del día, comunicaron que seguía siendo receptor del premio.

Pocos días después de que se anunciase el Nobel de Steinman y se difundiese en los medios de comunicación la noticia de su muerte, el cáncer de páncreas también se cobró la vida del cofundador y director de Apple, Steve Jobs. Víctima de una forma de la enfermedad poco frecuente y de crecimiento lento (un tumor neuroendocrino), Jobs vivió durante ocho años después de su diagnóstico, más de lo que suele alargarse la vida de los pacientes con esta dolencia. La supervivencia de Steinman, sin embargo, superó con creces lo que se esperaba. «No hay duda, algo prolongó su vida», dice Schlesinger.

Ahora los investigadores están tratando de resolver el misterio. A principios de 2012, el Instituto Baylor creó en Dallas el Centro Ralph Steinman para Vacunas contra el Cáncer. Palucka está desarrollando un ensayo clínico para tratar a pacientes con cáncer de páncreas con la misma vacuna que ayudó a crear para Steinman. En Argos, Nicolette está buscando su vacuna contra el cáncer de riñón a toda máquina. Ya han recibido la aprobación de la FDA para iniciar la fase III del ensayo clínico de la vacuna del cáncer de riñón que Steinman recibió.

En la opinión de Schlesinger, el mensaje científico de esta historia es «la inmunidad marca la diferencia». Pero la lección final es la que a Steinman le gustaba predicar: «hay muchas cosas por descubrir».

Katherine Harmon *es redactora de* Scientific American

PARA SABER MÁS

Identification of a novel cell type in peripheral lymphoid organs of mice, vol. 1: Morphology, quantitation, tissue distribution. Ralph M. Steinman y Zanvil A. Cohn en *Journal of Experimental Medicine*, vol. 137, n.º 5, págs. 1142-1162, 1973. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2139237**

Taming cancer by inducing immunity via dendritic cells. Anna Karolina Palucka et al. en *Immunological Reviews*, vol. 220, n.º 1, págs. 129-150, 2007.

Dendritic cell-based vaccination of patients with advanced pancreatic carcinoma: Results of a pilot study. Christian Bauer et al. en *Cancer Immunology, Immunotherapy*, vol. 60, n.º 8, págs. 1097-1107, 2011.



TIM O'BRIEN

BIODIVERSIDAD

¿QUÉ ESPECIES SOBRE-VIVIRÁN?

A semejanza de los médicos en el campo de batalla, los conservacionistas se ven obligados a decidir qué seres vivos deben salvarse y cuáles no

Michelle Nijhuis

Michelle Nijhuis, periodista especializada en ciencia y medioambiente, escribe para numerosas publicaciones. Elegida miembro de la Fundación Alicia Patterson en 2011, ha investigado las estrategias para proteger a las especies en peligro crítico.



El paíño ceniciento, una diminuta ave marina de color grisáceo, anida en once solitarias islas rocosas frente a las costas de California y México, en el océano Pacífico. Con un peso apenas mayor que el de una tarjeta de felicitación gruesa y obligado a bregar con ratas, ratones y gatos intrusos, gaviotas agresivas, vertidos de petróleo y el ascenso del nivel del mar, el paíño afronta una lucha desigual por la supervivencia. El último censo cifró en 10.000 los ejemplares vivos. Otras especies de paíños se hallan en un trance similar.

Con todo, al menos un grupo conservacionista ha decidido ignorar al paíño. En el invierno de 2008, la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre concentró sus esfuerzos, hasta entonces dispersos, en un número reducido de animales. Después de pasar varios meses analizando miles de especies de aves y mamíferos en declive en todo el mundo, los investigadores de esta sociedad seleccionaron varios cientos de ellos que podrían servir como piedra angular del trabajo de la organización. A continuación, consultaron a expertos con décadas de experiencia en el estudio de la fauna silvestre para acotar aún más las opciones.

Docenas de esos expertos se reunieron en pequeñas salas de conferencias en la ciudad de Nueva York, en el sudoeste de Montana y en Buenos Aires para tomar sus decisiones. Después de evaluar la importancia para el ecosistema, el valor económico y cultural y las posibilidades de servir como emblema conservacionista, emitieron un voto sobre cada especie, alzando una tarjeta roja, amarilla o verde. En los casos en que surgía un claro desacuerdo, los expertos defendieron sus posturas con citas científicas y las comisiones volvieron a votar de nuevo. A mitad de la primera jornada, la mayoría de los comités congregados habían descartado más de la mitad de las especies de sus listas.

Sin embargo, en algún momento de la tarde la realidad del proceso debió pasar factura en todas las reuniones. A medida que grupos enteros de especies, entre ellas los paíños, se consideraban valiosos pero prescindibles, algún científico debió caer presa del desánimo. Los otros miembros de la comisión debieron alentar a su colega, recordándole que las selecciones eran necesarias y que las respaldaban pruebas científicas sólidas. John Fraser, psicólogo de la conservación que moderaba las comisiones, sugirió hacer un receso. «Era importante reconocer la magnitud colosal de lo que estábamos haciendo; asistíamos a una pérdida superlativa», recuerda.

Los expertos sabían que todos los grupos conservacionistas y las agencias gubernamentales estaban tomando decisiones semejantes de manera tácita, pero el proceso adoptado por la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre convertía esas decisiones en un asunto más descarnado y doloroso. A medida que menguan los presupuestos, crece el estrés sobre el ambiente y los políticos y legisladores conceden más importancia a la economía que al planeta, muchos científicos han reconocido la necesidad de realizar un triaje, o selección. Afirman que ha llegado la hora de alzar las tarjetas de voto.

DECISIONES DIFÍCILES

El concepto de triaje en conservación se basa a grandes rasgos en su equivalente médico, un sistema empleado desde las guerras napoleónicas por los médicos castrenses para tomar decisiones. El triaje médico cuenta con diversas variantes, pero todas ellas implican algún tipo de selección de los pacientes en situaciones difíciles en las que el tiempo, la experiencia, los medios disponibles o todos ellos escasean. Las decisiones son dolorosas, pero se consideran esenciales en aras del bien común.

En 1973, sin embargo, cuando el Congreso de Estados Unidos aprobó la Ley de Especies Amenazadas, el ánimo imperan-

EN SÍNTESIS

Los grupos conservacionistas ya no pueden proteger a tantos animales y plantas como hasta ahora, de modo que están adoptando nuevos sistemas de selección para decidir qué especies deben salvarse y cuáles no.

Los criterios funcionales favorecen a las especies que desempeñan una función única en la naturaleza, tales como los pinos de corteza blanca, que proporcionan una fuente vital de alimento a los osos pardos.

Los criterios evolucionistas persiguen preservar la diversidad genética la cual puede ayudar a todas las especies del mundo a sobrevivir y a adaptarse a los rápidos cambios de las condiciones ambientales.

Otros métodos refinan la conocida estrategia de los puntos calientes, que dan prioridad a ciertas zonas para salvar ecosistemas enteros, aunque corren el riesgo de olvidar las necesidades humanas.

te no era de penuria, sino de generosidad. Considerada todavía hoy la ley ambiental con más poder del mundo, abarcaba todas las especies que no se consideraran plagas, desde los pigargos americanos hasta los escarabajos. Las posteriores decisiones de los tribunales confirmaron su amplio alcance. En su libro *Noah's Choice* («La elección de Noé»), el periodista Charles C. Mann y el economista Mark L. Plummer calificaron el fundamento de la ley como el principio del arca de Noé: en esencia, todas las especies son iguales y todas ellas pueden y deben ser salvadas, con independencia de su importancia para la humanidad.

Los problemas comenzaron a surgir a finales de los años ochenta del siglo pasado, cuando las proposiciones para incluir al cárabo californiano y a ciertas variedades de salmón en las listas de especies amenazadas pusieron en peligro los intereses económicos de las poderosas industrias maderera y pesquera, lo que desencadenó una serie de tentativas políticas ilegales para debilitar la ley. Los ambientalistas consiguieron repeler los ataques, pero la enconada lucha despertó los recelos de sus defensores ante cualquier propuesta de renovación de la ley, por más que estuviera destinada a mejorarla. En particular, temían que cualquier intento manifiesto de priorizar a las especies amenazadas —según el principio general del triaje— solo sirviera para reforzar los intentos de los oponentes para borrar especies de la lista. Si tales decisiones resultaban necesarias, debían realizarse con tranquilidad, lejos del ámbito político.

TARDE O TEMPRANO, SALVAR UNA ESPECIE VULNERABLE SERÁ DEMASIADO DIFÍCIL, PERO MUCHOS CONSERVACIONISTAS SE NIEGAN A ASUMIR LAS DECISIONES FATÍDICAS QUE ENTRAÑA EL TRIAJE

Según Holly Doremus, catedrática de Derecho de la Universidad de California en Berkeley, la comunidad ambientalista siempre ha evitado hablar de triaje, a pesar de saber que se estaba llevando a cabo. Hoy la selección de especies constituye una de las ideas más polémicas en biología de la conservación. Para muchos, no solo implica amenazas políticas a la legislación, como la Ley de Especies Amenazadas, sino también el abandono de la responsabilidad moral para con la naturaleza que defiende el principio de Noé.

PINOS O CAMELLOS

Los conservacionistas que defienden el triaje aseguran que pretenden incorporar un razonamiento más sistemático y mayor transparencia a las prácticas que vienen empleando desde hace tiempo. «La forma en que estamos actuando ahora mismo en Estados Unidos es la peor de las posibles», afirma Tim Male, vicepresidente de la organización Defensores de la Vida Silvestre. Suele realizarse una priorización improvisada. Se invierte más dinero allí donde hay conflicto o donde se cuenta con personal en el terreno.

En los últimos años, los investigadores han propuesto diversos criterios para tomar decisiones de selección, con objeto de aportar el máximo beneficio a la naturaleza. Algunos defienden sopesar la importancia de cada especie según su papel en el ecosistema, en un enfoque que podría considerarse «funcionalista». Para ellos, las especies amenazadas que desempeñan un cometido singular o cuya supervivencia garantiza la de muchas otras, deben ser protegidas antes que aquellas que presentan una función redundante [*véase* «De linces y hongos», por Berta Martín-López; Investigación y Ciencia, febrero de 2012]. Un ejemplo de esta estrategia es la campaña para proteger los pinos de corteza blanca de las Montañas Rocosas, que por su ubicación a gran altitud están sufriendo el alza de las temperaturas y las plagas de gorgojos que esta conlleva. Como los piñones ricos en grasas de los árboles constituyen un importante sustento para los osos pardos en primavera y otoño, numerosos grupos conservacionistas consideran el pino una especie prioritaria.

La ventaja de la estrategia funcionalista radica en que se centra en el papel ecológico y no en la mera abundancia de la especie, lo cual ofrece a los conservacionistas más posibilidades de proteger a los ecosistemas saludables. La estrategia, sin embargo, solo resulta útil en los sistemas bien conocidos, una minoría. Sin género de dudas, un análisis basado tan solo en criterios funcionales pasaría por alto numerosas especies de relevancia ecológica.

Como alternativa, el programa EDGE (Evolutionarily Distinct and Globally Endangered) of Existence, dirigido por la Sociedad Zoológica de Londres, aboga por priorizar a las especies a nivel genómico, una estrategia que podría considerarse «evolucionista». En lugar de centrarse en las especies conocidas que poseen muchos parientes cercanos, el programa otorga prioridad a las especies amenazadas dotadas de una genética peculiar. Algunos ejemplos son el camello bactriano (de dos jorobas); el equidna de hocico largo, un pequeño mamífero espinoso que pone huevos, y la salamandra gigante china, que puede alcanzar hasta dos metros de largo.

El enfoque evolucionista hace hincapié en la conservación de la diversidad genética, que puede ayudar a las especies del mundo a sobrevivir y a adaptarse a los cambios rápidos de las condiciones ambientales al fortalecer el acervo génico. Pero Martha Groom, ecóloga de la Universidad de Washington, advierte que la aplicación exclusiva de tal estrategia podría obviar amenazas más importantes que afectan a taxones enteros, lo que llevaría a la extinción de varios grupos de especies. «¿Qué sucederá cuando se vea amenazada una rama entera del árbol de la evolución?», se pregunta. «¿Qué haremos entonces?»

Es obvio que las especies son valiosas por muy diversos motivos. Unas desempeñan un papel vital en el ecosistema, otras son portadoras de genes únicos y otras brindan grandes servicios a la humanidad. Ningún criterio puede reunir por sí solo todas esas cualidades. La Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre combinó diferentes estrategias de selección en sus análisis: otorgó prioridad a las especies amenazadas de mayor tamaño y con una distribución geográfica más amplia con la esperanza de que su protección beneficiaría a muchos otros animales y plantas. También concedió más puntos a las especies con mayor singularidad genética. A continuación, los comités de expertos valoraron cualidades más subjetivas, como la relevancia cultural y el carisma, que, nos guste o no, ayudan a recaudar fondos.

Groom, quien ayudó a dirigir el análisis de la sociedad, afirma que optó por la estrategia mixta porque gran parte de la información que ella y sus colaboradores necesitaban se desconocía o era imposible de cuantificar. «Existe una enorme incertidumbre e ignorancia sobre los seres vivos», afirma. Aun así, al sumar los datos disponibles y las opiniones de los expertos, el análisis ha identificado un grupo reducido de especies de «prioridad global», a las que la organización podrá dedicar sus esfuerzos.

LOS ECOSISTEMAS ANTES QUE LAS ESPECIES

Dada la importancia de proteger no solo los animales sino también las relaciones que se establecen entre ellos, algunos investigadores defienden que las estrategias de selección deberían centrarse en los ecosistemas, en lugar de las especies. A finales de los años ochenta, el ambientólogo británico Norman Meyers propuso a sus colegas de todo el mundo que intentaran proteger el máximo número de especies, para lo cual debían hacer hincapié en las regiones donde abundaran plantas inexistentes en otros lugares del planeta y que a su vez estuvieran sometidas a una amenaza ambiental acuciante.

Meyers denominó esos lugares «puntos calientes». Él y sus colaboradores de la organización Conservación Internacional identificaron 25 puntos calientes en el planeta, desde la costa de California hasta Madagascar, que en su opinión debían gozar de la máxima prioridad. En cierto modo, esta estrategia combina las perspectivas funcionalista y evolucionista: protege las relaciones ecológicas al centrarse en ecosistemas enteros al tiempo que salvaguarda la diversidad genética al otorgar prioridad a las especies endémicas. La idea cuajó y hoy influye en las decisiones de numerosos filántropos, organizaciones ambientalistas y Gobiernos.

No obstante, en los últimos años algunos investigadores han criticado los puntos calientes porque simplifican el problema global y dejan de lado las necesidades humanas [*véase* «El hombre en los programas de conservación», por Peter Kareiva y Michelle Marvier; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2007]. «En su momento fue una idea brillante», afirma Hugh Possingham de la Universidad de Queensland en Australia, «pero estaba basada en dos únicos criterios».

En un esfuerzo por refinar el concepto, Possingham y sus colaboradores diseñaron Marxan, un programa informático muy utilizado en la actualidad. Este intenta maximizar la eficacia de las reservas naturales al tener en cuenta no solo la presencia de especies endémicas y el grado de las amenazas para la conservación, sino también factores como el coste de la protección y la «complementariedad», es decir, la aportación de cada nueva reserva a las zonas protegidas existentes. Los manglares, por ejemplo, no destacan por su riqueza en especies y quizá no serían seleccionados nunca si se les aplicase el análisis tradicional de los puntos calientes. El programa de Possingham, sin embargo, podría recomendar la protección de los manglares en una zona que ya contase con franjas protegidas representativas de otros tipos de bosque más diversos, engrosando así el número total de especies protegidas.

Pero las zonas protegidas y los parques pueden ser difíciles de crear y gestionar, y como el cambio climático ya está modificando la distribución geográfica de las especies, los límites estáticos tal vez no ofrezcan la mejor protección a largo plazo a algunas de las especies. Como solución a ese problema, Possingham ha creado un proceso de asignación de recursos que va más allá de la mera selección de puntos calientes y permite a los responsables sopesar los beneficios y los costes, así como las posibilidades de éxito, de las distintas opciones de conservación disponibles. «Se emprenden acciones, no se engendran especies», afirma Possingham. «Las prioridades deben concernir a las acciones porque, entre otras razones, las acciones ayudan a numerosas especies».

El Departamento de Conservación del Gobierno de Nueva Zelanda ha empleado el proceso de asignación de recursos para analizar las estrategias de protección de unas 710 especies autóctonas en declive.



DE ARRIBA ABAJO: TIM FITZHARRIS, KONRAD WOTHE, YVA MOMATIUK Y JOHN EASTCOTT, MINDEN PICTURES (*ganadores*); DE ARRIBA ABAJO: MARK CARWARDINE, GERRIT VYN Y KAZUMA ANEZAKI, MINDEN PICTURES (*perdedores*)

Ha llegado a la conclusión de que, si invierte en las actuaciones más baratas y con mayores posibilidades de éxito, con el mismo presupuesto podría evitar la extinción de un cincuenta por ciento más de plantas y animales. Aunque a algunos científicos les inquieta que el proceso haga excesivo énfasis en la conservación de un gran número de especies amenazadas y demasiado poco en la conservación del ecosistema, el análisis para la asignación de recursos está en marcha en Australia. Possingham, además, ha entablado conversaciones con responsables del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos.

«La gente cree que el triaje supone abandonar a su suerte a las especies o admitir la derrota», afirma Madeleine Bottrill, compañera de Possingham en Conservación Internacional. Pero muy al contrario, ella opina que cuantificar los costes y las compensaciones de cada acción dejará bien claro el balance. Las agencias y organizaciones pueden saber lo que se está salvando, lo que se está perdiendo y lo que se podría salvar con un presupuesto mayor, lo que les ofrece un argumento de peso para conseguir más financiación.

EL ÉXITO LLAMA AL ÉXITO

Puede que el propio acto de establecer las prioridades más abiertamente pueda incitar a las sociedades a invertir más dinero en las campañas de conservación. Male, de Defensores de la Vida Silvestre, afirma que los programas de priorización, lejos de exponer la naturaleza a riesgos políticos, ofrecen ventajas prácticas y políticas. «Si dedicamos más esfuerzos allí donde sabemos el modo de ayudar, conseguiremos más éxitos», opina. «Y esos éxitos constituyen un argumento sólido —tanto para los políticos como para la gente corriente— para dar continuidad a los programas de conservación.»

Pero pese a su eficacia, el sistema esconde pérdidas innegables que el triaje debe reconocer en la práctica. «Justificamos sin ninguna dificultad el esfuerzo que destinamos a cualquier cosa con un valor no declarado», afirma Richard Maloney, del Departamento de Conservación de Nueva Zelanda. «Pero nos cuesta admitir que como estamos trabajando con cierta especie, no vamos a financiar o a trabajar con otras siete u ocho, que se van a extinguir.» El propio Maloney se muestra reticente a la hora de señalar las especies que tal vez queden descartadas en el análisis de asignación de recursos que su agencia está llevando a cabo. Los pingüinos saltarrocas, que han visto mermar la reserva de krill a causa de la fusión del hielo marino provocada por el cambio climático, caen al final de la lista por el coste y la duración de las medidas de protección necesarias. Pero, según él, la escasa prioridad dada a esta especie no debe verse como una sentencia de muerte, sino como una llamada a la acción para otros grupos.

Tarde o temprano, una especie o un hábitat vulnerable (sea el pingüino saltarrocas o las pinedas de pino de corteza blanca) exigirá medidas que ningún Gobierno o colectivo podrán costear. ¿Qué sucederá entonces? ¿Seguirán las sociedades conservacionistas invirtiendo dinero en una causa perdida, o dejarán agonizar a la especie ante sus ojos, individuo tras individuo? Aunque el debate sobre el triaje viene de lejos, muchos conservacionistas se niegan a asumir la responsabilidad de las decisiones fatídicas que este entraña.

La gran dificultad estriba en que, tal y como sucede en el triaje médico en el campo de batalla, la raya entre la oportunidad y la causa perdida casi siempre es difusa. En los años ochenta del pasado siglo, cuando la población mundial del cóndor de California apenas sumaba 22 individuos, algunos ambientólogos dijeron que se le debía dejar «morir con dignidad». Pero otros esgrimieron el argumento evolucionista y reivindicaron medidas heroicas para salvar a esta rara reliquia del Pleistoceno. Gracias a una cuantiosa inversión de dinero, tiempo y experiencia, se inició un programa de cría en cautividad y reintroducción que hasta el momento ha logrado elevar el número de ejemplares en libertad a 217, cifra que, si bien no lo sitúa todavía fuera de peligro, lo aleja de la desaparición cierta.

«Está demostrado que podemos evitar la extinción», afirma John Nagle, catedrático de Derecho de la Universidad de Notre Dame, que ha escrito profusamente sobre temas ambientales. Pero «cuando se sabe que una extinción se puede evitar y se decide no hacerlo... eso es un trago amargo que nadie desea tomar», añade.

De forma similar, si se crea lo que el ecólogo de la restauración Richard Hobbs llama una «cesta demasiado pesada» para las especies cuya salvación resultaría demasiado costosa, un sistema de triaje podría hacer caer a las sociedades conservacionistas en el vicio de abandonar prematuramente las causas más arduas. Ello haría escoger las retribuciones económicas a corto plazo en lugar de los objetivos de conservación a largo plazo. La propia Ley de Especies Amenazadas contempla una disposición para ese tipo de cesta, que faculta a un comité de expertos a que, en circunstancias extraordinarias, autorice la violación de la ley por parte de un organismo federal. Pero convocar *ex profeso* a ese cónclave todopoderoso resulta difícil y hasta el momento solo ha habido una excepción notable a la ley: permitir que el Servicio Forestal de Estados Unidos autorizara algunas ventas de madera en entornos poblados por la variedad septentrional del cárabo californiano.

El cambio climático, el crecimiento demográfico y otros problemas mundiales que amenazan la biodiversidad crecen día a día y probablemente el número de especies que requerirán medidas heroicas para garantizar su supervivencia seguirá aumentando. Priorizar a las especies según su función ecológica, su historia evolutiva u otros criterios ayudará a diseñar las estrategias de conservación. Pero si quieren brindar un mayor beneficio a muchas otras especies, las sociedades conservacionistas tendrán que dar carpetazo a algunos de los esfuerzos más onerosos y con peores perspectivas.

En Estados Unidos, los expertos en derecho han sugerido diversas vías para reformar la Ley de Especies Amenazadas para tener en cuenta esta realidad, lo que ayudaría a que la ley soportara sin quebrarse la presión política. Pero Nagle afirma que la esencia de la ley, el principio de Noé, sigue plenamente vigente. Ante las tentaciones que trae consigo el triaje, afirma, la llamada a salvar a todas las especies sigue siendo un objetivo encomiable y, tal vez, hasta necesario. Del mismo modo que un médico trabaja sin descanso en el hospital de campaña para salvar vidas, las sociedades conservacionistas deberían seguir aspirando a cumplir el principio de Noé y abarrotar el arca hasta los topes.

PARA SABER MÁS

Noah's choice: The future of endangered species. Charles C. Mann y Mark L. Plummer. Knopf, 1995.

Optimal allocation of resources among threatened species: A project prioritization protocol. Liana N. Joseph et al. en *Conservation Biology*, vol. 23, n.º 2, págs. 328-338, abril de 2009.

Heatstroke: Nature in an age of global warming. Anthony D. Barnosky. Shearwater, 2010.

La mente alegre

Una mejor comprensión del modo en que el cerebro genera placer podría mejorar los tratamientos contra la adicción y la depresión, e incluso crear una nueva ciencia de la felicidad

Morten L. Kringelbach y Kent C. Berridge

En los años cincuenta, el psiquiatra Robert Heath, de la Universidad de Tulane, comenzó un controvertido programa. Mediante cirugía, implantaba electrodos en el cerebro de pacientes ingresados con epilepsia, esquizofrenia, depresión y otras enfermedades neurológicas graves. Su objetivo inicial consistía en localizar la base biológica de tales trastornos y, tal vez, por medio de la estimulación artificial de esas regiones, curar al individuo.

SCIENTIFIC AMERICAN (*fotoilustración*); GETTY IMAGES (*perfil de cabeza*); THINKSTOCK (*imágenes en el interior*); CORTESÍA DE LA NASA (*Luna*)



Según Heath, los resultados fueron espectaculares. Consiguió que pacientes catatónicos dados prácticamente por perdidos fueran capaces de sonreír, conversar e incluso reír. Pero el alivio duraba poco. Cuando la estimulación cesaba, volvían los síntomas.

Con el objetivo de prolongar los efectos beneficiosos de la terapia, Heath permitió que un grupo de pacientes apretara un botón para estimularse cuando sintieran necesidad de ello. Y algunos la sentían bastante a menudo. Un paciente homosexual de 24 años al que Heath trataba de depresión (y de su deseo hacia otros hombres) necesitó estimular sus electrodos unas 1500 veces durante una sesión de tres horas. Según Heath, esta autoestimulación obsesiva provocaba en el sujeto, el paciente B-19, sensaciones de placer, estados de lucidez y de confort (bienestar). Al terminar la sesión, el paciente protestó enérgicamente.

Los experimentos sirvieron para definir un conjunto de estructuras que se conocerían como el «centro cerebral del placer». También supusieron el inicio de un movimiento, no solo en el ámbito científico sino también en la cultura popular, que buscaba comprender mejor la base biológica del placer. A lo largo de los treinta años siguientes se han identificado las sustancias enviadas y recibidas por las regiones cerebrales descritas por Heath y otros, las cuales llevan estos mensajes de alegría. Y se comenzó también a imaginar «un mundo feliz» en el que la activación de esos centros produciría felicidad instantánea.

Sin embargo, el descubrimiento del supuesto centro del placer no ha conllevado ningún gran adelanto en el tratamiento de las enfermedades mentales. Puede que incluso haya confundido a los científicos haciéndoles creer que entendían cómo el cerebro codifica y genera el placer. Investigaciones recientes llevadas a cabo en roedores y humanos sugieren ahora que la activación eléctrica o química de esas estructuras no genera placer en absoluto. Podría simplemente producir ansiedad y de ahí la frenética autoestimulación.

Con la ayuda de las técnicas modernas de biología molecular combinadas con métodos mejorados de estimulación profunda del cerebro, nuestros laboratorios, entre otros, están redefiniendo los circuitos cerebrales del placer. Y nos estamos encontrando con que tales sistemas se hallan más restringidos (y son más complejos) de lo que se creía en el pasado. Mediante la localización de los verdaderos fundamentos neurológicos del placer, esperamos allanar el camino para descubrir tratamientos más selectivos y más efectivos contra la depresión, la adicción y otros trastornos (y quizás entender mejor las raíces de la felicidad humana).

ELECTRODOS ENGAÑOSOS

Bien lo experimentemos como estremecimientos de gozo o como un cálido instante de satisfacción, el placer es más que un complemento efímero (es decir, algo que se busca solo cuando las necesidades básicas del individuo están cubiertas). La sensación es, de hecho, fundamental para la vida. El placer alimenta y mantiene el interés de los animales por aquello que necesitan para sobrevivir. La comida, el sexo, y en algunos casos la interacción social, generan sensaciones positivas que sirven como recompensas naturales para los animales, incluidos los humanos.

Las primeras pruebas sobre la base biológica de esas sensaciones fueron obtenidas hace unos sesenta años por los descubridores de los llamados electrodos del placer. James Olds y Peter Milner, de la Universidad McGill, buscaban las regiones cerebrales que influían en el comportamiento de los animales. En estudios anteriores realizados en la Universidad de Yale (mediante la inserción de electrodos en cerebros de ratas) se había identificado un área que, al ser estimulada, provocaba que el animal evitara cualquier acción que hubiera coincidido con la estimulación. Cuando intentaron reproducir esos resultados, Olds y Milner dieron con una región cerebral que los roedores tratarían de activar expresamente (del mismo modo que los animales repiten una tarea o un comportamiento que les proporciona una recompensa).

Para su sorpresa, al colocar electrodos en diferentes regiones (algunas veces no donde pretendían), hallaron una parte del cerebro cuya activación con una corriente eléctrica débil parecía agradar a los animales. Ratas que habían sido introducidas en grandes cajas regresaban una y otra vez a la esquina donde habían recibido la descarga. Mediante esta técnica, Olds y Milner se dieron cuenta de que podían conducir a los roedores a casi cualquier lugar. Incluso, en algunos casos, elegían la estimulación antes que la comida. Si se apretaba el botón cuando las ratas se encontraban a medio camino en un laberinto que prometía un jugoso puré al final, los animales se quedaban clavados sin molestarse en alcanzar el premio.

Y lo que resultó aun más sorprendente: cuando se permitía a las ratas estimular su propio cerebro mediante una palanca que activaba los electrodos, estas lo hacían casi obsesivamente (más de 1000 veces en una hora). Cuando se apagaba la corriente, los animales accionaban la palanca unas cuantas veces más y después se iban a dormir.

A raíz de esos resultados, Olds y Milner declararon: «Quizás hayamos localizado en el cerebro un sistema cuya peculiar función consiste en producir un efecto de recompensa sobre el comportamiento». Las regiones identificadas (el núcleo accum-

Morten L. Kringelbach es director de Hedonia: Grupo de Investigación TrygFonden, de la Universidad de Oxford y la Universidad Aarhus de Dinamarca.

Kent C. Berridge es profesor de la cátedra James Olds de psicología y neurociencia de la Universidad de Michigan.

EN SÍNTESIS

Investigaciones recientes han puesto al descubierto centros del cerebro que, cuando son estimulados, aumentan las sensaciones de placer.

Estos centros hedónicos no forman parte de los circuitos de recompensa considerados en el pasado como la base de los sentimientos positivos (una ruta que hoy se cree que interviene más en el deseo que en el placer).

Las regiones cerebrales superiores reciben la información de los circuitos de placer y de recompensa para crear la representación consciente de la cálida sensación de bienestar que asociamos con la alegría.

El desacoplamiento de los sistemas cerebrales que generan el deseo y el disfrute podría dar lugar a comportamientos adictivos (una información útil en el desarrollo de nuevos tratamientos).

ANATOMÍA DE LA ALEGRÍA

Vías hacia el placer

El placer es una experiencia compleja que abarca distintos aspectos que van desde la anticipación y el deseo hasta la sensación y la satisfacción. No sorprende, por tanto, que varias regiones cerebrales cooperen en la generación de esta agradable sensación de bienestar.

Deseo
Disfrute
Placer consciente

Ínsula
Corteza cingulada
Interpretación y modulación
Núcleo accumbens
Corteza orbitofrontal
Amígdala
Pálido ventral
Área tegmental ventral

Deseo y disfrute

Durante un tiempo se pensó que un circuito neural (*azul*) que comienza en el tronco encefálico y alcanza el prosencéfalo era el único mediador del placer. Pero en realidad este interviene más en el deseo. Además de esta vía, los llamados centros hedónicos, como los dos que se muestran aquí (*rojo*), interaccionan para crear la sensación de disfrute. Un conglomerado de regiones corticales (*rosa*) traduce después la información recibida desde los circuitos del deseo y del disfrute a un placer consciente, y reajusta esta sensación basándose en las informaciones procedentes de otras regiones cerebrales.

Terminal de una neurona
Receptor de anandamida
Encefalina
Neurona vecina
Anandamida
Receptor de encefalina

La química del disfrute

En un centro hedónico, dos neurotransmisores embriagadores cooperan para aumentar las sensaciones de placer. Un estímulo agradable, como un dulce, provoca que una neurona de la zona (*arriba*) libere encefalina, un opioide producido por el cerebro. La encefalina interacciona con receptores proteicos de una neurona vecina (*abajo*) y ello podría estimular la síntesis de anandamida, la versión cerebral de la marihuana. Al difundirse la anandamida desde su lugar de síntesis puede interaccinoar con receptores de la primera neurona, lo que intensifica la sensación de placer y tal vez estimule aún más la producción de encefalina. Estas dos sustancias juntas forman un bucle de disfrute que dispara el placer.

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

bens, situado en la base del prosencéfalo, y la corteza cingulada, que forma un collar alrededor del haz fibroso que conecta las mitades izquierda y derecha del cerebro) se consagraron como la base operativa del circuito de la recompensa.

Casi de inmediato, otros científicos reprodujeron esos efectos al realizar descubrimientos similares en primates superiores y humanos. Heath, en particular, llevó la interpretación de sus resultados hasta el límite, insistiendo en que la estimulación de esas regiones no solo reforzaba el comportamiento sino que también producía sensaciones de euforia. En opinión de muchos científicos, así como del público general, tales estructuras se identificaron como el principal centro cerebral del placer.

Sin embargo, hace unos diez años, comenzamos a preguntarnos si la autoestimulación eléctrica constituía la mejor medida del placer. ¿Cómo podíamos estar seguros de que los sujetos activaban esas regiones porque les gustaba lo que sentían y no por alguna otra razón? Para explorar el circuito del placer de una manera más exacta, pensamos que hacía falta concebir una manera diferente de identificar lo que en realidad generaba disfrute en los sujetos (incluidos los animales).

UNA MEDIDA DEL PLACER

En los experimentos con personas, evaluar el placer constituye una tarea bastante sencilla: solo hay que preguntar. Por supuesto, puede que las valoraciones resultantes no reflejen con exactitud las sensaciones subyacentes. Esta estrategia no se puede aplicar en los animales de laboratorio, pero en cambio en ellos se pueden explorar con más facilidad los procesos biológicos.

Existe un enfoque alternativo inspirado en Charles Darwin. En su libro de 1872 *La expresión de las emociones en los animales y en el hombre*, Darwin observó que los animales cambian su estado afectivo en respuesta a las situaciones ambientales (dicho de otro modo, hacen muecas). Se sabe que los mecanismos neurales que subyacen a estas expresiones funcionan de un modo similar en la mayoría de los mamíferos. De ahí que ciertos gestos faciales se hayan conservado en animales tan distantes como los roedores y los humanos (por ejemplo, la expresión de fruición ante un alimento sabroso).

La comida constituye uno de los placeres más universales, así como un requisito fundamental para la supervivencia. También es una de las herramientas experimentales más accesibles que usan los psicólogos y neurocientíficos para estudiar el comportamiento animal. En nuestras investigaciones hemos encontrado que la respuesta a la comida nos ofrece una ventana desde la que observar placeres íntimos.

Cualquiera que haya pasado algún tiempo con recién nacidos sabrá que incluso los humanos más jóvenes tienen sus medios para informar a sus cuidadores del sabor de un alimento. Los sabores dulces hacen relamerse los labios con satisfacción, mientras que los amargos suelen recibirse con bocas abiertas, sacudidas de cabeza y limpiezas vigorosas de la boca. Esta misma respuesta también ocurre en ratas, ratones y primates no humanos. Cuanto más guste el sabor, más a menudo se relamen los labios. Si se graban en vídeo las respuestas a la comida y se cuenta después el número de veces que los sujetos sacan la lengua (como queriendo capturar cada molécula de sabor), podemos medir cuánto ha complacido un determinado estímulo gustativo. Esta información la hemos empleado para deducir la parte del cerebro donde reside el placer.

DESEAR NO ES DISFRUTAR

Una de las primeras cosas que descubrimos es que el placer en el cerebro no se produce donde (o como) se creía. Las regiones que habían sido identificadas por Olds y Milner, en la parte frontal del cerebro, son activadas por la dopamina, un neurotransmisor liberado por neuronas que se originan cerca del tronco encefálico. Si estas áreas regulasen el placer, inundarlas con dopamina (o eliminar la dopamina por completo) debería alterar la respuesta de un animal ante un estímulo agradable. Pero no observamos tal efecto.

Para esos experimentos, nuestro colega Xiaoxi Zhuang, de la Universidad de Chicago, creó ratones que carecían de una proteína que recupera la dopamina tras su liberación por una neurona excitada, enviándola de vuelta al interior de la célula. Los animales transgénicos con esta mutación mantienen concentraciones inusualmente altas de dopamina en todo el cerebro. Sin embargo, los ratones no parecían obtener más placer con los dulces que sus compañeros de jaula no manipulados. En comparación con los roedores normales, los ratones con mayores niveles de dopamina corrían más rápido hacia las recompensas dulces; sin embargo, no relamían sus labios más a menudo. Al contrario, lo hacían incluso menos que los ratones que presentaban una cantidad media de dopamina.

Lo mismo se observa en ratas en las que se ha elevado el valor de dopamina por distintos medios. Por ejemplo, la inyección de anfetamina en el núcleo accumbens provoca un aumento de dopamina en esa área. Pero, de nuevo, los dulces no parecen más placenteros para esas ratas tras la estimulación química de la dopamina (aunque los animales están más motivados para obtenerlos).

A la inversa, las ratas en las que se ha eliminado la dopamina no muestran ningún deseo por los dulces. Estos animales morirán de hambre a menos que se los alimente activamente. Pero en cambio, si se coloca en su boca cualquier dulce lo encuentran placentero y se relamen los bigotes.

Parece, por tanto, que los efectos de la dopamina son más complejos de lo que se creía. La sustancia contribuiría más a la motivación que a la sensación real de placer. También en humanos, los niveles de dopamina parecen reflejar mejor su percepción de cuánto «desean» una golosina más que cuánto les «gusta».

Lo mismo puede ocurrir con la adicción. Las drogas inundan el cerebro con dopamina, en especial las regiones asociadas con el deseo. Esta descarga de dopamina no solo provoca una intensa ansia, sino que también sensibiliza las células de esas regiones ante futuras exposiciones a la droga. Es más, el trabajo de nuestro colaborador Terry Robinson, de la Universidad de Michigan, hace pensar que esta sensibilización puede persistir durante meses o años. Por ello, incluso aunque una droga ya no aporte placer, Robinson arguye que un adicto sigue sintiendo una urgente necesidad de consumirla (una desafortunada consecuencia de la acción de la dopamina).

A raíz de esta nueva interpretación, pensamos que los electrodos del placer que estimulan la acumulación de dopamina en el cerebro de las ratas (y de humanos) podrían no ser tan placenteros como se suponía en un principio. En concordancia con esta idea, observamos que la activación de los electrodos que aumentan la dopamina en el núcleo accumbens de una rata la motivaban para que comiera y bebiera, pero no conseguían que la comida le resultara más placentera, sino justo lo contrario. Las ratas empujadas a ingerir dulces se limpiaban la boca y sacudían la cabeza (signos de desagrado) como si la corriente hubiera provocado que el dulce se amargara o les resultara desagradable. El hecho de que los electrodos fuercen a las ratas a consumir grandes cantidades de una comida que no les produce placer demuestra que el deseo y el disfrute están controlados por mecanismos cerebrales diferentes.

Pensamos que ese control diferencial ocurre también en humanos. La aplicación de corriente a través de los clásicos electrodos del placer hizo sentir al menos a un paciente un fuerte deseo de beber. En otros, como en B-19, la estimulación eléctrica despertó un deseo sexual imperioso. En aquel tiempo, esas ansias de sexo se consideraron una prueba de placer. Pero en nuestra extensa revisión de la bibliografía jamás hemos hallado que un paciente encontrara expresamente placenteros los electrodos implantados. B-19 nunca exclamó: «¡Oh, qué agradable!». En lugar de ello, los electrodos provocaban en él, y también en otros, el deseo de recibir una nueva estimulación (probablemente, no porque les gustara sino porque se les inducía la necesidad).

CENTROS HEDÓNICOS

El deseo y el disfrute intervienen a la vez para que una experiencia se perciba como gratificante. Por lo que tiene sentido que los verdaderos centros del placer del cerebro (aquellos directamente responsables de generar sensaciones placenteras) estén ubicados en algunas estructuras identificadas previamente como partes del circuito de recompensa. Uno de esos centros hedónicos se halla en una subregión del núcleo accumbens, el área periférica medial. Y otro se sitúa en el pálido ventral, una estructura profunda del cerebro cercana a la base del prosencéfalo que recibe la mayoría de sus señales del núcleo accumbens.

Para localizar esos centros, buscamos regiones cerebrales que, al ser estimuladas, amplificaran la sensación de placer (por

ejemplo, haciendo que las cosas dulces resultaran aún más agradables). La estimulación química de esos centros con encefalina (una sustancia producida por el cerebro similar a la morfina) aumenta el gusto de las ratas por el dulce. La anandamida, versión cerebral del principio activo de la marihuana, hace lo mismo. Otra hormona liberada por el cerebro cuando se tiene hambre, la orexina, puede estimular también los centros hedónicos, lo que ayuda a potenciar el sabor de las comidas.

Cada uno de esos centros constituye solo una pequeña parte de las estructuras en las que residen (tan solo alrededor de un milímetro cúbico en el cerebro de una rata y probablemente no más de un centímetro cúbico en un humano). Sin embargo, como las islas de un archipiélago, se conectan unos a otros (y a otras regiones cerebrales que procesan señales de placer) para formar un poderoso circuito integrado del placer.

Ese circuito es bastante robusto. Sobre la base de nuestra experiencia, la inutilización de distintos componentes del circuito del placer no disminuye la respuesta habitual a un dulce. Con una excepción. Dañar el pálido ventral parece eliminar la capacidad de un animal para disfrutar de una comida agradable, que la percibe como repugnante.

Por otra parte, sentir una euforia intensa es más difícil que disfrutar los pequeños placeres de cada día. Esto puede ser debido a que un fuerte aumento del placer (como el inducido químicamente en animales de laboratorio) parece requerir la activación de toda la red a la vez. La ausencia de uno solo de los componentes debilita la euforia.

No está claro si el circuito del placer, y en particular, el pálido ventral, funciona de la misma manera en los humanos. La mayoría de las personas que acuden a la consulta con un daño limitado en esas estructuras presentan también afectadas las zonas adyacentes. Por tanto, es difícil valorar si en los humanos el pálido ventral y otros componentes del circuito son fundamentales para la sensación de placer. Conocemos un caso de un paciente cuyo pálido ventral se dañó durante una sobredosis de droga. Después de aquello, contaba que sus sentimientos estaban dominados por la depresión, la desesperanza, la culpa y la incapacidad de sentir placer, lo que apunta al papel central de esa estructura hasta hoy minusvalorada.

HASTA LA SACIEDAD

El circuito no actúa en solitario para regular las sensaciones de alegría. Existen otras regiones del cerebro que entran en juego para añadir el cálido destello de placer a una sensación o experiencia. Esas estructuras superiores contribuyen a determinar lo agradable de una experiencia en unas circunstancias concretas. Tienen en cuenta, por tanto, si uno está hambriento o saciado, o si ya ha tenido suficiente de un placer en particular. Después de comerse una bandeja entera de *brownies*, por ejemplo, incluso un adicto confeso al chocolate encontrará mucho menos apetecible una chocolatina.

En el caso de la comida, la saciedad selectiva puede haber evolucionado en parte porque empuja a los animales a buscar una amplia variedad de nutrientes en lugar de fijarse en un único alimento favorito. Parece estar codificada en cierta zona del cerebro, la corteza orbitofrontal. Localizada debajo de la corteza prefrontal (que en los humanos se halla justo sobre los ojos), recibe información del núcleo accumbens y del pálido ventral. Parece modular la representación consciente del placer, al aportar esa deliciosa oleada de bienestar que asociamos con la gratificación y al atenuar tal sensación cuando ya tenemos suficiente.

Con la ayuda de técnicas de neuroimagen, hemos descubierto que la actividad de una pequeña región de la corteza orbitofrontal, la zona medioanterior, muestra una estrecha correlación con el placer subjetivo de una sensación agradable, como el sabor de la leche con cacao. Con el primer sorbo, la zona exhibe una enorme actividad. Cuando los sujetos han consumido suficiente bebida, la actividad cesa, lo que produce que la experiencia deje de resultar placentera.

Los estudios sobre los efectos terapéuticos de la estimulación profunda del cerebro aportan más datos sobre el importante papel de la zona medioanterior en el placer humano [*véase* «Marcapasos para el cerebro», por Morten L. Kringelbach y Tipu Z. Aziz; Mente y cerebro, n.º 42]. La técnica se está usando para tratar algunas afecciones y se ha visto que atenúa el dolor crónico en personas que no responden a otros tratamientos. En uno de nuestros pacientes, un amputado que sentía dolor en la pierna que le faltaba, la estimulación en un área del tronco encefálico no solo le alivió el dolor, sino que además le produjo sensaciones de placer. Los estudios de neuroimagen revelaron que además se producía una ráfaga de actividad en la zona medioanterior. El tratamiento de la depresión y otros tipos de anhedonia (incapacidad para experimentar placer) mediante este tipo de estimulación en centros específicos del sistema del placer constituye un campo activo de investigación [*véase* «Neuromodulación contra la depresión resistente», por C. V. Torres Díaz et al.; Mente y cerebro, n.º 55].

Del mismo modo, los nuevos estudios pueden revelar la manera en que se relacionan los circuitos que gobiernan el placer y la recompensa. En circunstancias normales, los centros hedónicos están acoplados al sistema de recompensa mediado por dopamina, de tal modo que deseamos lo que nos hace sentir bien, y evitamos o nos mostramos indiferentes a lo que no. En el caso de la adicción, estos sistemas se desconectan de algún modo, lo que provoca que el individuo siga deseando intensamente cosas que ya no le producen placer. Tal disociación podría contribuir a otros comportamientos compulsivos, como los atracones de comida o la ludopatía. Entender cómo y por qué ocurre este desacoplamiento puede ayudarnos a descubrir mejores métodos para anular los cambios cerebrales que llevan a la adicción, y así restaurar la coincidencia natural entre el deseo y el disfrute.

Aristóteles dijo una vez que la felicidad consiste en dos ingredientes fundamentales: *hedonia*, o placer, más *eudaimonia,* darle significado a nuestra vida. Aunque se ha progresado en la descripción de las bases biológicas de la *hedonia*, sabemos muy poco acerca de cómo el cerebro crea el concepto más amplio de una vida bien vivida. Esperamos, sin embargo, que con el tiempo este rompecabezas también pueda resolverse, y que lo que se descubra ayude a la gente a unir placer y propósito, elevando las experiencias de cada día a algo realmente satisfactorio, quizás incluso sublime.

PARA SABER MÁS

Pleasure centers in the brain. James Olds en *Scientific American*, octubre de 1956.

A common neurobiology for pain and pleasure. Siri Leknes e Irene Tracey en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 9, págs. 314-320, abril de 2008.

The pleasure center: Trust your animal instincts. Morten L. Kringelbach. Oxford University Press, 2008.

Pleasures of the brain. Dirigido por Morten L. Kringelbach y Kent C. Berridge. Oxford University Press, 2010.

Building a neuroscience of pleasure and well-being. Kent C. Berridge y Morten L. Kringelbach en *Psychology of Well-Being: Theory, Research, and Practice*, vol. 1, n.º 3, octubre de 2011. **www.psywb.com/content/1/1/3**.

SALUD

SENESCENCIA CELULAR

Se pensaba que las células que dejan de dividirse constituían una de las defensas del organismo frente al cáncer. Ahora se cree que también pueden contribuir a esa enfermedad y causar el envejecimiento

David Stipp

En 1999, Jan M. van Deursen y sus colaboradores en la Clínica Mayo de Rochester, en Minnesota, querían comprobar si los cromosomas con alteraciones profundas causaban cáncer. Diseñaron ratones que carecían de una proteína que ayuda a mantener la integridad cromosómica. Aunque las cadenas de ADN de los roedores se vieron dañadas, de modo sorprendente, los animales no presentaron una mayor tendencia a sufrir tumores. En su lugar, padecieron una extraña mezcla de anomalías, entre ellas, cataratas, reducción de la masa muscular, adelgazamiento rápido de la grasa bajo la piel y curvatura espinal progresiva, lo que les hizo asemejarse a dromedarios. Además, tendían a fallecer jóvenes.

ANATOMY BLUE



Examen celular: Las células senescentes (aquellas que han perdido la capacidad de dividirse) pueden identificarse por el color. Se vuelven azules cuando se exponen a cierta sustancia.



David Stipp es periodista científico especializado en medicina. Desde finales de los años noventa se ha centrado en la gerontología.

Van Deursen desconocía la causa de esos trastornos. Pero en 2002 leyó un informe sobre ratones que sufrían un envejecimiento acelerado y quedó impactado por las fotografías. En ellas se observaba que la espalda de los animales se encorvaba conforme envejecían. De repente, cayó en la cuenta: los ratones con los que él había trabajado también envejecían muy deprisa. En un estudio más exhaustivo, el equipo de Mayo descubrió que las células de varios tejidos de los roedores habían pasado de forma prematura a un estado de senescencia celular, en el que las células pierden para siempre la capacidad de dividirse y adquieren otras anomalías. Esta falta de división celular explicaría las alteraciones en los huesos, músculos, ojos y piel observadas por el grupo de Van Deursen.

Pero los investigadores no se contentaron con esa explicación y dieron un paso más con el fin de modificar los síntomas: al introducir una segunda lesión genética en los ratones, eliminaron las células senescentes a medida que se formaban y, de ese modo, frenaron varios aspectos del envejecimiento rápido de los animales. El descubrimiento, publicado en noviembre de 2011, trajo el campo de la senescencia celular al primer plano de la gerontología y dio nueva vida a una idea controvertida propuesta hace más de 50 años: que la pérdida de la capacidad divisoria de las células lleva al deterioro gradual del organismo. Otra investigación reciente ha atraído también la atención sobre el proceso por un motivo relacionado. La senescencia celular, que durante mucho tiempo se creyó que era una defensa contra el cáncer, ha demostrado tener dos caras: bloquea el crecimiento del tumor en algunos aspectos, pero lo incentiva en otros.

Los nuevos hallazgos indican que, si se pudiera atrasar el inicio de la senescencia celular podría posponerse el cáncer y otras enfermedades que aparecen en los últimos estadios de la vida. Puesto que la eliminación de las células senescentes en los ratones de la Clínica Mayo exigió una manipulación genética compleja, ese tratamiento no podrá ofrecerse a las personas en un futuro próximo. Sin embargo, no todo está perdido. En lugar de ello, tal vez funcionen una serie de intervenciones más simples.

CÉLULAS VIEJAS Y CANSADAS

El estudio de las células senescentes ha conllevado sorpresas estimulantes y ha obligado a reexaminar antiguos conceptos. En un principio se las consideraba células que habían agotado la capacidad de reproducirse. En 1961, Leonard Hayflick, codescubridor del estado de senescencia, determinó que, en las células humanas, algún tipo de marcador molecular dispara la senescencia después de unos 50 ciclos de replicación. Lanzó la teoría de que ese estancamiento en la proliferación celular, denominado «límite de Hayflick», constituiría la base del envejecimiento de todo el cuerpo al impedir que las células sustituyeran a las que se iban muriendo en los tejidos dañados. Asimismo, postuló que las células están programadas para perder la capacidad de multiplicarse después de cierto número divisiones. Ese límite interno impediría que las células alteradas proliferasen de forma incontrolada y se volviesen cancerosas. En otras palabras, la contribución de la senescencia celular al envejecimiento representaría el precio que debemos pagar para que nos ayude a defendernos frente al cáncer.

La teoría de que las células senescentes dan lugar al envejecimiento ganó terreno después de que los estudios iniciados en los años setenta del siglo xx desvelasen la existencia de un reloj tras el límite de Hayflick. Cada vez que una célula se divide, sus telómeros (tramos del ADN en los extremos de los cromosomas) se acortan; las células dejan de multiplicarse cuando sus telómeros se reducen más allá de cierta longitud. Al parecer, nuestras células estarían programadas para volverse senescentes al avanzar la edad.

Sin embargo, la investigación posterior desmontó la teoría. A finales de los años noventa varios laboratorios informaron que la capacidad proliferativa de las células cutáneas no disminuía de forma importante con la edad. Ello significaba que el límite de Hayflick no necesariamente se alcanzaba con la suficiente frecuencia como para alterar de forma notable la reparación de los tejidos durante la vida de una persona. En concordancia con esa idea, otros investigadores demostraron que los ratones poseían telómeros muy largos, lo que aparentemente impedía que sus células proliferativas dejasen de funcionar antes de que los animales muriesen. En 2001, dos gerontólogos, Harriet y David Gershon, declararon sin rodeos en un artículo de revisión que la teoría telomérica del envejecimiento debería considerarse irrelevante.

A medida que la teoría del reloj molecular se desmoronaba, se reunían pruebas a favor de la otra supuesta función de la senescencia celular: defender frente al cáncer. Hacia el decenio de los noventa del siglo xx se sabía que ciertas lesiones en las células, como las mutaciones genéticas, podrían desencadenar la proliferación incontrolada y otros cambios característicos del cáncer. Como resultado, varias formas de daño celular podrían inducir la senescencia, supuestamente para impedir que las células alteradas se convirtieran en malignas. Así, mediante el rociado de las células con una sustancia oxidante que dañara el ADN se podría inducir la detención caracterís-

EN SÍNTESIS

Antes se suponía que las células senescentes (que han perdido la capacidad de dividirse) contribuían al envejecimiento al minar la reparación de los tejidos. Se creía que estas entraban en senescencia para evitar volverse cancerosas cuando el daño las ponía en riesgo de proliferar de forma incontrolada.

Más tarde, la idea de que las células senescentes desempeñan un papel en el envejecimiento de los tejidos y los organismos cayó en descrédito. Sin embargo, ahora la idea ha vuelto a ganar fuerza.

Las nuevas investigaciones indican que las células pueden contribuir al envejecimiento del modo propuesto inicialmente y estimulando también la inflamación. Además, pueden dañar las células de su alrededor y fomentar así el cáncer.

Algunos estudios con ratones indican que retrasar la senescencia celular ayudaría a frenar el envejecimiento y a posponer algunas de las enfermedades asociadas a él.

NUEVO ENFOQUE

Células que se vuelven nocivas

Las células senescentes (aquellas que ya no pueden dividirse) se veían en el pasado como elementos inofensivos, aunque con dos caras (*izquierda*): defensoras frente al cáncer (porque evitan la proliferación indefinida) y colaboradoras en el deterioro que subyace al envejecimiento (porque se necesita la división celular para la reparación tisular). Hoy en día, se aceptan ambas funciones, aunque la implicación de esas células en el envejecimiento se puso en tela de juicio durante un tiempo. Además, se sabe que pueden segregar sustancias que contribuyen al crecimiento tumoral en sus inmediaciones y avivan la inflamación en los tejidos (*derecha*).

Célula normal

Célula senescente, incapaz de dividirse

Célula senescente no secretora

Creencia anterior

Consecuencias

Positiva: la propia célula evita volverse cancerosa

Célula precancerosa

La célula precancerosa detiene su camino antes de dividirse de forma incontrolada

Negativa: la célula senescente favorece el envejecimiento tisular

Daño tisular

La célula no puede realizar las divisiones necesarias para la reparación tisular

Nueva perspectiva

Célula senescente secretora

Molécula segregada

Consecuencias

Negativa: las secreciones contribuyen al cáncer en otras células

Célula precancerosa o cancerosa

Tumor

Las secreciones estimulan la proliferación excesiva

Negativa: las secreciones producen inflamación

Células inflamatorias activadas en el tejido

La inflamación puede contribuir al cáncer, así como a trastornos relacionados con la edad, tales como la enfermedad de Alzheimer, la diabetes y la aterosclerosis

GERT NIELSEN

tica de la proliferación. Es revelador que, en 1997 un equipo liderado por Manuel Serrano, ahora en el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas en Madrid, descubriese la posibilidad de provocar la senescencia mediante un aumento sostenido de señales en la célula que la instarían a dividirse. Los oncogenes (genes mutados que contribuyen al crecimiento incontrolado de los tumores) son conocidos por amplificar esas señales continuas.

Esos y otros descubrimientos sugirieron que un mecanismo interno de las células contra el cáncer busca sin cesar signos de daño que puedan dar lugar a un crecimiento incontrolado. Si estos signos se mantienen y sobrepasan un determinado umbral, el mecanismo detiene de forma permanente la división celular mediante la activación de la senescencia. Ello confiere a la célula la posibilidad de reparar el daño y seguir existiendo en un estado de actividad reducida.

PROMOTORES DEL CÁNCER

Entonces tuvo lugar un hallazgo impactante. Se observó que, en algunas ocasiones, las células senescentes favorecían el cáncer. Entre los descubridores figuraba Judith Campisi, ahora en el Instituto Buck para la Investigación sobre el Envejecimiento de Novato, en California. A raíz de ello, planteó una hipótesis que ha ayudado a descartar la idea de que las células senescentes permanecen inactivas. La hipótesis sostiene que las células pueden fomentar el crecimiento de tumores y ocasionar daños generalizados de otro tipo.

Los primeros indicios de que las células senescentes pueden desempeñar tal maliciosa función surgió a finales de los años noventa, al verificarse que podían alterar las células y tejidos de sus inmediaciones (microambiente). Esas zonas se convertirían en «malos vecindarios» que instigarían la formación del tumor. En 2001, el laboratorio de Campisi corroboró esa

idea con un estudio innovador. En él demostraba que las células senescentes mantenidas en una placa de cultivo estimulaban a las células precancerosas del mismo cultivo, las cuales, tras inyectarse en ratones, daban lugar a tumores anormalmente agresivos en los animales. El efecto del mal vecindario parecía derivar de la tendencia de numerosas células senescentes a segregar una mezcla de moléculas potencialmente peligrosas. Algunas de ellas contribuirían a la proliferación celular y otras destruirían las proteínas extracelulares que rodean y sostienen a las células. (Se cree que las células tumorales que se propagan emplean las mismas enzimas para degradar los límites estructurales de los tejidos.) En 2008, Campisi publicó más pruebas sobre lo que ella denominó «fenotipo secretor asociado a la senescencia», o SASP (de *senescence-associated secretory phenotype*), para referirse a células senescentes que, en ciertos contextos, segregan moléculas dañinas.

¿Por qué las células que durante tanto tiempo se habían considerado responsables de la prevención del cáncer contribuían de forma activa a esa enfermedad? Campisi se basó en estudios sobre la cicatrización de las heridas, entre otras líneas de investigación, para intentar explicar el modo en que adquirieron tal función.

Una línea de trabajo demostró que el cáncer y la cicatrización de las heridas, aunque parezca extraño, guardan cierta semejanza. Los tumores y las heridas parcialmente cicatrizadas están enlazados con proteínas fibrosas que se forman cuando los precursores de las proteínas de la coagulación salen de los vasos sanguíneos y, tras polimerizarse, dan lugar a una matriz que sirve de apoyo a la reconstrucción del tejido. Impresionado por esta similitud, en 1986, Harold Dvorak, patólogo de la Escuela de Medicina de Harvard, especuló que los tumores utilizaban la respuesta de cicatrización del cuerpo, a la que alteraban para ayudar a su crecimiento anómalo. Concluyó que, debido a esta maquiavélica táctica, los tumores aparecen como una serie interminable de heridas que inician continuamente la cicatrización pero que nunca la terminan por completo.

Otra línea de trabajo reveló que las células senescentes participan en la cicatrización de las heridas. Cuando se dañan los tejidos, ciertas células de alrededor reaccionan entrando en senescencia, tras lo cual estimulan una fase inflamatoria que inicia la cicatrización. La fase implica la secreción de mensajeros químicos, las citocinas, que atraen a las células del sistema inmunitario y las activan para luchar contra las infecciones y eliminar las células muertas y los productos de desecho. Más tarde, las células sanas se multiplican para reemplazar a las que se han perdido; luego, la fase proliferativa da paso a la de remodelación, durante la cual, las células senescentes segregan enzimas degradantes para terminar con las proteínas fibrosas destinadas al andamio de reparación; tal destrucción limita la formación de la cicatriz.

Al encajar esas piezas, Campisi postuló que más allá de aprovechar la senescencia celular para evitar la proliferación excesiva de las células dañadas, la evolución favoreció ese mecanismo para la reparación de las heridas, lo que supuso la adición del fenotipo SASP en el repertorio de las células. Por desgracia, el modo secretor hace que las células senescentes se conviertan en elementos perniciosos en los tumores, ya que se adueñan del programa de cicatrización de las heridas para promover su propio crecimiento. De igual modo, su capacidad para avivar la inflamación conlleva otras consecuencias lamentables: se cree que un bajo nivel de inflamación promueve la progresión no solo del cáncer, sino también de la aterosclerosis, la enfermedad de Alzheimer, la diabetes de tipo 2 y otras enfermedades asociadas a la vejez.

IMPULSORES DEL ENVEJECIMIENTO

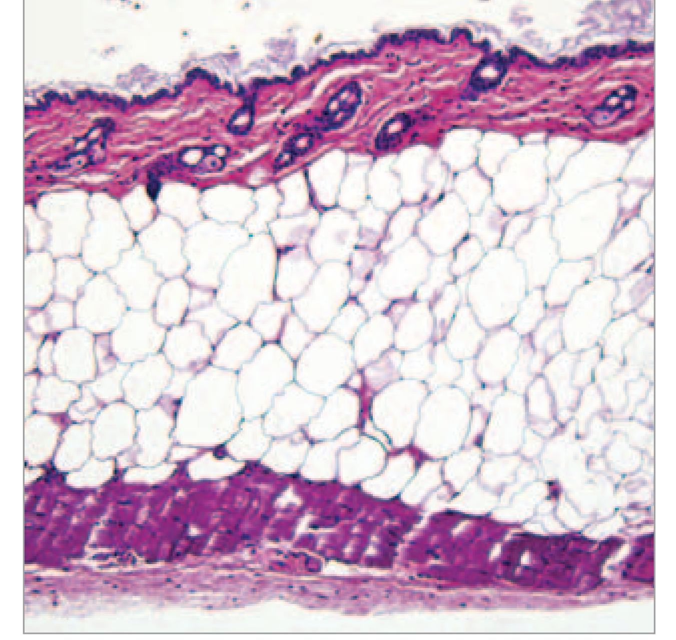
De hecho, a medida que se iba descubriendo que las células senescentes podían fomentar el cáncer, empezaron también a acumularse pruebas sobre su función en el envejecimiento. En particular, se observó que las células senescentes aparecían con una frecuencia sospechosa en los tejidos alterados de roedores y humanos, así como en todo el cuerpo de los individuos envejecidos. En 2006, se demostró que el declive de la función inmunitaria que se produce en los ratones más viejos es paralelo a una mayor senescencia de las células madre que generan de forma continua varios tipos de células inmunitarias.

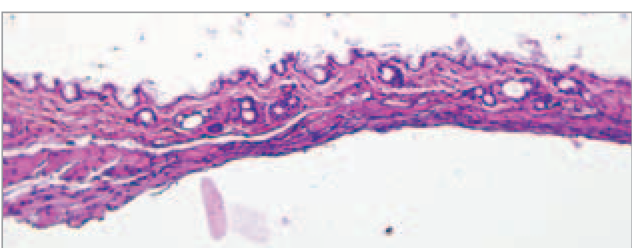
Algunos de esos hallazgos fueron posibles gracias en parte a la identificación de las características que convierten una célula en senescente. Uno de los marcadores de senescencia más útil es un valor elevado de una proteína codificada por el gen $p16^{INK4a}$ (abreviado *p16*), descubierto en 1993 por David Beach, de la Universidad Queen Mary de Londres. Más adelante se observó que la actividad de *p16* contribuía a que las células dejaran de dividirse cuando detectaban diversos tipos de daño.

Norman E. Sharpless, de la facultad de medicina Chapel Hill, de la Universidad de Carolina del Norte, y sus colaboradores llevaron a cabo una serie de estudios en los que comprobaron una correlación entre la concentración de la proteína p16 y el envejecimiento. Demostraron que los valores aumentaban con la edad en las células de roedores y humanos. Además, ese aumento se asociaba a una menor capacidad de las células para proliferar y reparar los tejidos dañados. En 2004, el equipo publicó que se producía un incremento notable de p16 en casi todos los tejidos de los roedores de edad avanzada. Este se podía mitigar con la restricción calórica (desde los años treinta se sabía que una dieta estricta prolongaba la esperanza de vida y promovía un envejecimiento saludable en varias especies). Cinco años después de ese descubrimiento, el laboratorio de Sharpless demostró que el envejecimiento iba acompañado de un aumento acentuado de la concentración de p16 en los linfocitos T del sistema inmunitario humano. Curiosamente, se verifica un alto nivel de ese parámetro en las personas fumadoras y físicamente inactivas, lo que sugiere que estos comportamientos podrían propiciar la senescencia celular.

Además de comprobar la correlación entre p16 y la senescencia celular con respecto a algunas características del envejecimiento, Sharpless y sus colaboradores han publicado una serie de resultados experimentales que refuerzan la idea de que la senescencia celular contribuye al deterioro de los órganos y los tejidos. En 2006, describieron que los ratones envejecidos con los genes *p16* inactivos (en teoría, con una menor tendencia a producir células senescentes) se asemejaban a los ratones más jóvenes en cuanto a su mayor capacidad de regenerar las células pancreáticas destruidas tras la exposición a una toxina. Además, los ratones envejecidos con la actividad de *p16* suprimida regeneraban mejor las neuronas en ciertas partes del cerebro que sus compañeros normales. Y por último, la reducción de los niveles de p16 en las células madre del sistema sanguíneo (las que dan lugar a las células del sistema inmunitario y a los eritrocitos) retrasaba la pérdida del poder regenerativo de las células madre asociado a la edad.

Otros estudios llevados a cabo durante los últimos cinco años han sugerido que las diferencias genéticas que determinan la cantidad de proteína p16 sintetizada por las personas (y





Contribución al envejecimiento: En los ratones capaces de eliminar las células senescentes, la capa de grasa de la piel se mantiene exuberante (*blanco, arriba*), mientras que en los otros ratones esta se reduce con el tiempo (*abajo*).

CORTESÍA DEL LABORATORIO DE VAN DEURSEN

por tanto, la velocidad a la que sus células se vuelven senescentes a medida que envejecen) ayudan a conocer los riesgos de muchas enfermedades relacionadas con la edad, entre ellas, la aterosclerosis y la enfermedad de Alzheimer. Sharpless afirma que estos importantes descubrimientos han impulsado el interés médico por p16 y representan un avance en la investigación del papel de la senescencia celular en el declive asociado al envejecimiento.

Sin embargo, el estudio del año pasado de la Clínica Mayo proporcionó la prueba más directa de las posibles ventajas de interferir en la senescencia celular. Para ello, el grupo de Van Deursen se valió de la función de p16 como etiqueta identificativa de las células senescentes. El equipo creó ratones transgénicos con defectos cromosómicos que provocaban la senescencia celular prematura en diversos tejidos. También presentaban un gen que llevaba a la destrucción de las células por cierto fármaco si sus genes *p16* estaban activados; las células no senescentes, cuyos *p16* no estaban activados, no se vieron afectadas. El tratamiento farmacológico durante toda la vida eliminó las células senescentes y demoró el adelgazamiento de la capa de grasa bajo la piel, la pérdida de masa muscular, el desarrollo de cataratas y el inicio de otros deterioros relacionados con el envejecimiento que tenían lugar de forma prematura en los ratones no tratados. El tratamiento iniciado en una etapa tardía retrasó las pérdidas de grasa y músculo asociadas a la edad.

A pesar de los fascinantes resultados de la Clínica Mayo, estos no demuestran, por sí mismos, que la eliminación de las células senescentes durante el envejecimiento normal resulte útil en las personas o prolongue su vida. Campisi advierte que el estudio no ha confirmado que las células senescentes dirijan el envejecimiento normal, puesto que los ratones del estudio sufrían una senectud acelerada. Y no todos los aspectos de esa vejez conllevaban una senescencia celular rápida. De hecho, eliminar las células senescentes no ayudaba a evitar la principal causa de muerte de los roedores (disfunción prematura del corazón y de los vasos sanguíneos) y, por tanto, su esperanza de vida no se prolongaba de forma significativa.

MEDIDAS SENCILLAS

Aun así, supongamos que en algún momento se descubra que la reducción de la senescencia celular retrase el envejecimiento o, al menos, la aparición de arrugas y algunos trastornos graves asociados a la edad. ¿Cómo se podría intervenir de forma segura en el proceso de senescencia?

Reproducir el estudio de Mayo en las personas requeriría modificar sus genomas antes del nacimiento, de modo que la opción no será factible a corto plazo, si es que lo es alguna vez. La simple inhibición de la actividad de los genes *p16* con un fármaco probablemente resultaría contraproducente porque incrementaría el riesgo no deseado de proliferación celular y cáncer. Sin embargo, existen algunas opciones sencillas que nos podrían ayudar.

El hecho de que los fumadores y las personas sedentarias tiendan a presentar mayores niveles de p16 hace pensar que no fumar y hacer ejercicio de forma regular ayudaría a prevenir el tipo de daño molecular que promueve la senescencia celular. La pérdida de peso puede constituir otra opción. De hecho, Van Deursen y su colaborador en Mayo, James Kirkland, proponen que los precursores de las células adiposas, los preadipocitos, pueden inducir un trastorno similar a un envejecimiento acelerado en animales y personas obesos. Ello se debe a que un gran número de células tienden a convertirse en senescentes y, de acuerdo con la teoría de Campisi, promueven una inflamación crónica de bajo nivel en todo el cuerpo.

Algunos datos preliminares sugieren también que cierto fármaco, la rapamicina, puede inhibir la senescencia celular sin fomentar el cáncer. De modo interesante, la administración crónica de rapamicina con la dieta en ratones ha demostrado prolongar su esperanza de vida. Y, en fecha reciente, el laboratorio de Campisi puso de manifiesto que ciertos medicamentos antiinflamatorios suprimían el modo destructivo SASP de las células senescentes. Pero, por el momento, Sharpless apunta que la manera más prudente de combatir la deletérea senescencia celular consiste en no fumar, comer de forma razonable y hacer ejercicio físico.

Nadie sabe todavía si frenar la senescencia celular puede ralentizar el envejecimiento normal. Sin embargo, hoy en día, la teoría de que las células senescentes contribuyen de forma importante al deterioro relacionado con la edad a nivel orgánico y tisular está perdiendo fuerza. Parece cada vez más probable que este conocimiento conducirá algún día a nuevas y potentes formas de fomentar una vejez saludable.



PARA SABER MÁS

The youth pill: Scientists at the brink of an anti-aging revolution. David Stipp. Penguin Group, 2010.

Four faces of cellular senescence. Francis Rodier y Judith Campisi en *Journal of Cell Biology*, vol. 192, n.º 4, págs. 547-556, 21 de febrero de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21321098**

Clearance of p16^{Ink4a}-positive senescent cells delays ageing-associated disorders. Darren J. Baker et al. en *Nature*, vol. 479, págs. 232-236; 10 de noviembre de 2011.

Blog donde el autor escribe acerca de la ciencia del envejecimiento: **www.davidstipp.com**

Gottfried Vosgerau es profesor de filosofía en la Universidad de Düsseldorf. Sus intereses se centran en las teorías de la mente y de la cognición, la neurofilosofía, la metafísica de la mente y la filosofía del lenguaje.



COGNICIÓN

El lenguaje y la razón

¿Qué relación guardan entre sí lenguaje y pensamiento? ¿Razonamos siempre mediante un monólogo interno o podemos hacerlo sin recurrir a las palabras?

Gottfried Vosgerau

«Los hombres creen que su razón demanda las palabras; pero también sucede que las palabras tornan su fuerza contra la razón.» Estas reflexiones fueron escritas por Francis Bacon en 1620, en su obra *Novum organum*. ¿En qué consisten exactamente los pensamientos? ¿Constan de la oración misma, o son más bien una idea abstracta que representamos por medios lingüísticos? En una conferencia que impartí en cierta ocasión, hablaba sobre un pensamiento que había anotado en un papel. Un compañero señaló: «Hablas sobre un pensamiento, ¡pero en tu hoja veo una oración!». Tan sutil distinción puede resultar acertada. Sin embargo, trate usted de poner sobre el papel cualquiera de sus pensamientos sin emplear palabras. Todo lo más, algo así se encontrará al alcance de un matemático.

El problema que ponen de manifiesto los ejemplos anteriores nos conduce a la pregunta sobre la relación entre lenguaje y pensamiento. ¿Usamos la lengua para expresar nuestros pensamientos o es la lengua en sí la herramienta que nos faculta para pensar?

Muchos tendrán la sensación de que, cuando reflexionan, llevan a cabo una especie de monólogo interior. ¿Es el pensamiento, en esencia, un habla interna? Aunque de manera intuitiva esta opción se antoja plausible, lo cierto es que dicho monólogo interior solo se nos hace patente cuando nos concentramos y renunciamos a cualquier otra actividad. Por tanto, cabe la posibilidad de que esa habla interna solo acompañe al razonamiento en aquellos momentos en los que no usamos nuestro aparato lingüístico para otros fines. Puede que se trate de un efecto secundario asociado al pensamiento, pero no de algo imprescindible para que este tenga lugar.

La experiencia cotidiana aporta suficientes ejemplos que apoyan la segunda hipótesis. Es cierto que, por lo general, recurrimos al lenguaje para expresar nuestras ideas. Por tanto, si estas ya se encontrasen disponibles verbalmente, semejante acción no nos supondría ningún esfuerzo. Con frecuencia, sin embargo, acabamos dando muchas vueltas a las palabras: sabemos lo que pensamos y lo que nos gustaría expresar, pero no damos con la formulación correcta. En otras ocasiones, al intentar entender un problema complejo, comprobamos con desesperación que toda explicación verbal se muestra inútil y que solo una representación icónica, como un diagrama, nos permite abordarlo. Si pensásemos con palabras, las explicaciones lingüísticas nos ayudarían notablemente más que las imágenes.

EN SÍNTESIS

La reflexión consciente se asocia con frecuencia a un habla interior. En ocasiones, sin embargo, nos debatimos para encontrar palabras con las que expresar una idea que ya tenemos en mente. Ello apunta a una capacidad prelingüística de razonamiento.

Con todo, la facultad de pensar no puede entenderse sin conceptos, si bien estos podrían ser no verbales. Algunos experimentos han demostrado que también los animales disponen de conceptos sencillos y, con ello, de razonamientos básicos.

En todo caso, algunos conceptos parecen imposibles de adquirir en ausencia del lenguaje. Los expertos debaten hasta qué punto influye la lengua sobre el pensamiento. ¿Aporta esta estructuras cognitivas inexistentes en el pensamiento prelingüístico?



Un antiguo debate: ¿Toma el pensamiento una forma esencialmente lingüística o existen otras maneras de razonar?

CONOCIMIENTO DEL JUICIO

Un destacado defensor de la dependencia lingüística del pensamiento fue el filósofo estadounidense Donald H. Davidson (1917-2003). Según él, el verdadero pensamiento requiere disponer del concepto de juicio. Además, solo podrá tener juicios propios quien sepa lo que significa poseer un juicio. Para adquirir dicho concepto, deberemos tratar con otras personas y conocer sus juicios: un acto para el que la comunicación verbal resulta imprescindible. Nótese que el argumento no implica la necesidad de aprender la palabra «lluvia» para poder reflexionar sobre la lluvia. Antes bien, Davidson considera que, en general, el habla constituye un requisito para poder acceder al razonamiento.

Con todo, la tesis anterior adolece de sus puntos débiles. La principal objeción estriba en el hecho de que pensar sobre una idea no es lo mismo que saber que en ese momento nos encontramos reflexionando sobre ella. Sin duda, un gato puede percibir sensaciones. ¿Debe por ello saber en qué consiste una percepción? ¡Por supuesto que no! Disponer del concepto de percepción implica, entre otras cosas, saber que una percepción puede ser falsa; algo que, en lo que respecta al gato, podemos permitirnos poner en duda. En el mismo sentido, también debería ser posible concebir un pensamiento sin necesidad de saber qué es un pensamiento.

Por otro lado, existen otros dos argumentos de carácter general que se oponen también a la supuesta dependencia entre el pensamiento y el lenguaje. En tal caso, resulta indiscutible que en primer lugar deberemos adquirir una lengua. Pero ¿cómo aprender una expresión lingüística si no podemos pensar en absoluto acerca del concepto correspondiente? El filósofo José Luis Bermúdez, de la Universidad de Texas A&M, ha razonado a partir de la palabra «yo». Un niño no aprenderá el significado de dicho vocablo hasta que no sea capaz de concebirse mentalmente a sí mismo como una persona. En particular, no se trata de que un niño pronuncie la palabra «yo» y la emplee como si fuese un nombre, sino de que aprenda su significado, lo cual podemos describir como usar la palabra «yo» para referirse a sí mismo. Solo después de que el niño logre formar ideas sobre el yo (por ejemplo, como fuente de las propias acciones —incluida el habla—), podrá comprender el significado de la palabra «yo».

El segundo argumento remite al caso de los seres privados de habla, como animales o niños pequeños. Estos, a pesar de carecer de lengua, disfrutan de un amplio espectro de capacidades cognitivas que, en esencia, no se diferencian de las que muestran las personas adultas. Así las cosas, supondría una pura arbitrariedad afirmar que unos piensan y otros no. En definitiva, nos vemos obligados a aceptar la posibilidad de un pensamiento independiente del lenguaje.

CATEGORIZACIONES Y CONCEPTOS

¿Qué define el pensamiento? Una idea típica, como «eso es un coche rojo», se caracteriza por contener una serie de conceptos (en este caso, *coche* y *rojo*) que se refieren a objetos. Aquí radica la diferencia con la simple percepción. Aunque carezca de los conceptos correspondientes, también un perro verá que el coche es rojo, pero sus facultades se limitarán a distinguir el rojo de otros colores. De hecho, la misma capacidad se encuentra al alcance de instrumentos de medición sencillos: un detector de luz roja emitirá una señal cuando sobre él incida radiación de dicho color; sin embargo, en tal caso jamás hablaremos de razonamiento.

La cuestión sobre la mejor manera de caracterizar los conceptos cuenta con una larga tradición en filosofía. Según una de las teorías actuales, propuesta por Albert Newen, de la Universidad de Bochum, y Andreas Bartels, de la Universidad de Bonn, han de satisfacerse cuatro condiciones para poder afirmar que disponemos del concepto *rojo*. En primer lugar, deberíamos ser capaces de reconocer dicha propiedad en objetos diferentes. Además, a un mismo objeto deberíamos poder asignarle otras propiedades (como, por ejemplo, que sea de metal). En tercer lugar, habremos de entender que el rojo guarda relación con otros colores, pero que no tiene nada que ver con, digamos, las formas geométricas. Por último, no deberíamos emplear el concepto de forma automática, sino, hasta cierto punto, con independencia de la situación perceptiva.

Los cuatro criterios anteriores aseguran que disponer de un concepto no se reduce a clasificar un objeto en el sentido de colocarlo en una de entre varias estanterías, sino de categorizarlo de la manera correcta atendiendo a todas sus características (*rojo* en calidad de color, *de madera* en lo que se refiere al material, etcétera). Lo que ello implica puede apreciarse con claridad a partir de los conocidos experimentos realizados entre 1977 y 2007 con el loro Alex. La investigadora conductual Irene M. Pepperberg, de la Universidad Brandeis en Waltham, entrenó al animal y demostró que este disponía de ciertas habilidades conceptuales. El ave no solo distinguía entre varios colores, materiales y formas, sino que era capaz de aplicar dicho conocimiento a nuevos objetos. Con ello, satisfacía los dos primeros requisitos enunciados arriba. Además, indicaba mediante sonidos en qué categoría se asemejaban o se diferenciaban dos objetos: mismo color, distinta forma, etcétera (tercera condición). Por último, Alex no cotorreaba al azar sin más cuando se le presentaba un objeto, sino que respondía de manera precisa a las preguntas (cuarto criterio).

Junto a tales tareas de categorización, que también pueden observarse en los niños, los conceptos aportan a nuestro pensamiento una determinada estructura, la cual permite nuevas combinaciones sistemáticas. Por ejemplo, si alguien dispone de los conceptos *elefante* y *rojo*, podrá imaginar elefantes rojos a pesar de no haber visto criaturas semejantes en su vida. Constatar esta facultad en seres silentes resulta, desde luego, muy complicado. Sin embargo, dicha habilidad puede quedar patente si estos demuestran una capacidad para aplicar los conceptos en cuestión a objetos que poseen nuevas combinaciones de características.

Nicola S. Clayton y Anthony Dickinson, de la Universidad de Cambridge, han demostrado que los arrendajos poseen esa facultad combinatoria. En su experimento, los científicos escondían dos tipos de alimentos, de los cuales uno (A) sabía mejor que el otro (B), pero se echaba a perder mucho más rápido. Cuando a los pájaros se les permitía buscar la comida antes de que A se echase a perder, desenterraban el alimento más sabroso. Pero si, por el contrario, se les obligaba a esperar más rato, se dirigían directamente hacia el alimento B. Semejante comportamiento demuestra que estas aves pueden relacionar la información temporal con la espacial, una capacidad que requiere una estructura mental equiparable al razonamiento. Podemos concluir que, al menos hasta cierto punto, los arrendajos pueden pensar.



Los experimentos con el loro Alex (*fotografía*) demostraron que el animal poseía sorprendentes facultades conceptuales, un requisito para el razonamiento.

CORTESÍA DE ARLENE LEVIN-ROWE, LABORATORIO PEPPERBERG, UNIVERSIDAD BRANDEIS

MULTAS Y ELECTRONES

Contamos, pues, con buenas razones para creer que existe el pensamiento sin habla. Pero ¿qué significa exactamente una afirmación como la anterior? ¿Que cada oración que expresamos se apoya en un pensamiento que no guarda relación alguna con la lengua? En absoluto. Algunos conceptos necesitan un trasfondo lingüístico. Entender el concepto *multa*, por ejemplo, requiere saber qué son las reglas sociales, así como que su infracción puede acarrear sanciones monetarias. Convenciones sociales tan concretas se establecen y se transmiten a través de la lengua. Sin ella, parece imposible adquirir una representación del significado de palabras como «multa».

Algo similar ocurre con los conceptos teóricos, como el del electrón. Estos requieren una comprensión de la teoría completa a la que pertenecen, y las teorías siempre se transmiten por medio del lenguaje. Por tanto, tales nociones resultan, en esencia, dependientes de la lengua. En este caso sí podemos afirmar que «las palabras tornan su fuerza contra la razón», como escribiera Bacon.

Cabe concluir que, si bien pensamiento y lenguaje existen de manera independiente, pueden influirse uno al otro. Ello nos lleva a formular dos cuestiones básicas. ¿Cómo caracterizar los pensamientos (no lingüísticos) y demarcar los límites que los separan de fenómenos más básicos, como la percepción? Por otro lado, ¿dónde comienza exactamente la lengua a configurar nuestro pensamiento y de qué manera ocurre eso?

Para responder a la primera pregunta, cabe señalar que la caracterización ya cuenta con suficiente poder explicativo. Dado que los loros o los arrendajos, carentes de habla, muestran com-

portamientos que en los humanos calificaríamos como razonamientos, también a aquellos deberíamos atribuirles una capacidad de raciocinio. En este punto resulta de capital importancia no trivializar el concepto de razón a fin de no aguar su poder explicativo. En particular, no deberíamos concluir de manera automática que todo comportamiento aparentemente refinado implica una capacidad de razonamiento. Las hormigas, por ejemplo, transportan a sus compañeras muertas afuera del hormiguero. Sin embargo, la hormiga no razona nada al respecto: actúa como consecuencia de un acto reflejo desencadenado por una sustancia aromática que desprenden los cadáveres. Así, ¿dónde acaba una cadena estímulo-respuesta y dónde comienzan a aparecer pensamientos básicos? Se trata de una pregunta de difícil respuesta que aún proporciona abundante materia para discutir.



Los arrendajos pueden relacionar informaciones espaciales y temporales, un comportamiento que apunta a un razonamiento conceptual. En los experimentos, cesaban de picotear los alimentos escondidos si estos, a pesar de ser más sabrosos, se habían echado a perder.

En lo que se refiere a la segunda cuestión (la interacción entre lenguaje y pensamiento), existe al menos un aspecto empírico que puede separarse de la cuestión filosófica: los experimentos permiten determinar qué facultades cognitivas dependen del habla. Esta pregunta ha sido investigada por el psicólogo evolutivo Hannes Rackoczy, de la Universidad de Gotinga. Para él, dichas facultades son, ante todo, aquellas relacionadas con la capacidad para atribuir a otras personas estados mentales, como los pensamientos.

Se ha demostrado que algunos simios, e incluso ciertos animales de compañía, gozan de una comprensión básica de las intenciones ajenas. Sin embargo, la aptitud para diferenciar entre pensamientos propios y ajenos solo aparece en los humanos y, además, de la mano del lenguaje. Los niños sordos que reciben una educación oral sufren deficiencias no solo en lo que concierne al desarrollo del lenguaje, sino también en su capacidad para atribuir pensamientos a otras personas. Pero si, por el contrario, crecen en un ambiente en el que se emplea una lengua de signos, no muestran tales insuficiencias. Los experimentos futuros ayudarán a esclarecer, cada vez más, la influencia del lenguaje sobre el desarrollo del razonamiento.

Sin embargo, el aspecto filosófico de la cuestión continúa abierto. ¿Qué modificaciones esenciales ejerce la lengua sobre el pensamiento? ¿Puede el lenguaje fomentar la aparición de estructuras inexistentes en el pensamiento prelingüístico? ¿Posibilita acaso nuevas clases de conceptos imposibles de reducir a razonamientos más básicos?

En fecha reciente hemos visto surgir un intenso debate acerca de tales cuestiones, englobadas bajo el nombre de «cognición arraigada» (*grounded cognition*). Esta aborda la cuestión de si nuestra capacidad para razonar se sustenta en otras aptitudes más básicas o si, por el contrario, conforma una facultad independiente del resto. En el primer caso, no parece muy plausible que la influencia del lenguaje resulte determinante. Si, por el contrario, el pensamiento constituye una facultad autónoma, cabe preguntarse de qué se compone y cómo se desarrolla. Parece difícil que la capacidad de razonar surja de la nada; antes bien, parece estar basada, o anclada, en otras aptitudes más básicas. De qué constan esos cimientos sigue siendo uno de los misterios aún sin resolver de la filosofía.



El habla se revela necesaria para distinguir los pensamientos propios de los ajenos. Los niños sordos que han recibido una educación oral no solo manifiestan una merma en sus capacidades lingüísticas, sino también mayores dificultades para atribuir pensamientos a otras personas. Si, por el contrario, crecen en un ambiente en el que se emplea la lengua de signos, desarrollan sin retraso ambas facultades.

NICOLAS S. CLAYTON Y IAN CANNELL, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*arrendajo*); © KIM GUNKEL/ISTOCKPHOTO (*niña*)

PARA SABER MÁS

The paradox of self-consciousness. J. L. Bermúdez. The MIT Press, 1998.

Episodic-like memory during cache recovery by scrub jays. N. S. Clayton y A. Dickinson en *Nature*, vol. 395, págs. 272-274, 1998.

Animal minds and the possession of concepts. A. Newen y A. Bartels en *Philosophical Psychology*, vol. 20, págs. 283-308, 2007.

From thought to language to thought: Towards a dialectical picture of the development of thinking and speaking. H. Rakoczy en *Grazer Philosophische Studien*, vol. 81, págs. 77-103, 2010.

Lenguaje y pensamiento. Lera Boroditsky en *Investigación y Ciencia* n.º 415, abril de 2011.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Golpe frío al calor

Ya Aristóteles observó que, bajo ciertas condiciones, el agua caliente se congela antes que la fría. Más de 2300 años después, el fenómeno sigue sin aclararse

El agua caliente puede helarse antes que la fría. Lejos de ser una farsa, este fenómeno paradójico se conoce desde la Antigüedad. Redescubierto en la década de los años setenta del siglo XX por físicos aficionados, el efecto Mpemba —tal es su nombre— ha dado lugar a una abundante bibliografía. Veamos de qué se trata.

Cuando introducimos en el congelador dos recipientes idénticos y con la misma cantidad de agua, pero a temperaturas diferentes, se comprueba que bajo ciertas condiciones el agua caliente se congela antes que la fría. El fenómeno ganó protagonismo en 1963 a raíz de las observaciones de un bachiller tanzano, Erasto Mpemba: su helado se había solidificado antes que los de sus compañeros, a pesar de que él había introducido la leche en el congelador cuando aún estaba caliente. Tras haber hecho partícipes de su descubrimiento a un buen número de profesores de instituto incrédulos, halló una respuesta más receptiva en Denis Osborne, profesor universitario en Dar es-Salaam. Este reprodujo con éxito la experiencia y, junto con Mpemba, publicó los resultados.

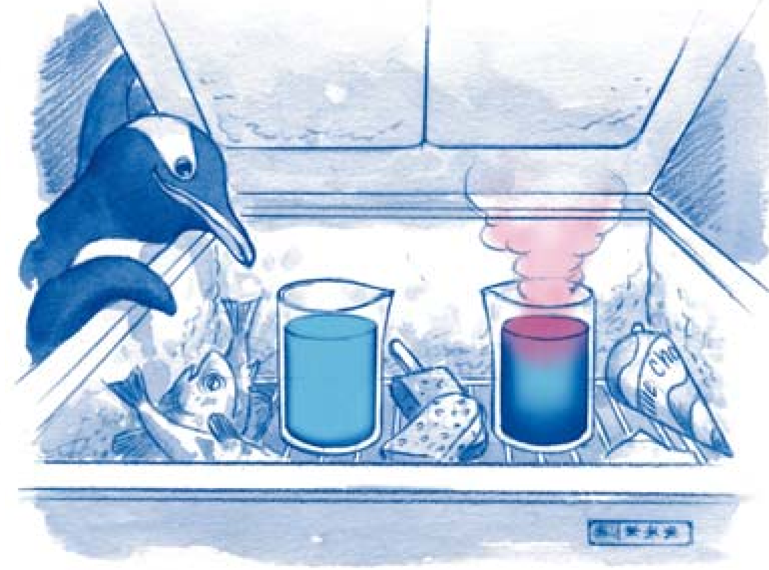
El efecto se puso de moda. A favor de las conclusiones de Osborne y Mpemba se citaron grandes nombres: Aristóteles, en el primer libro de su *Meteorológica*, relata que los habitantes de Ponto rociaban las estacas de sus empalizadas con agua caliente para asegurarlas, ya que así congelaba antes. En el siglo XIII, Roger Bacon refería en su *Opus majus* que el agua caliente vertida sobre hielo se congelaba con mayor rapidez que la fría. Su observación confirma la sabiduría popular: en Canadá, las pistas de patinaje se rocían con agua caliente para engrosarlas. Y, como es sabido, las cañerías de agua caliente revientan bajo los efectos del hielo con más facilidad que las de agua fría.

Todas esas observaciones, sin embargo, resultan vagas y corresponden a condiciones experimentales diversas e imprecisas. Consciente de tal dificultad, el físico estadounidense Jearl Walker efectuó en 1977 sus propios ensayos. Tras algunas tentativas infructuosas, descubrió que el efecto Mpemba se manifestaba a la perfección si elegía con acierto la forma del recipiente y la cantidad de agua. En tales casos observó que, conforme aumentaba la temperatura inicial del conjunto recipiente-agua, el tiempo que el líquido tardaba en alcanzar los cero grados una vez introducido en el congelador primero crecía, luego alcanzaba un máximo y, por

BRUNO VACARO



En Canadá se vierte agua caliente sobre las pistas de patinaje para acondicionarlas. Debido al efecto Mpemba, el agua caliente se congela más rápido que la fría. La evaporación, más cuantiosa en el caso del agua caliente, podría ser una de las causas del fenómeno.



El agua caliente (*derecha*) se enfría de manera menos uniforme que el agua fría (*izquierda*), pues en su seno tienen lugar movimientos de convección de gran amplitud en los que el agua fría (*azul*) baja y la caliente (*rosa*) sube. Junto a la evaporación, esa convección influye en la velocidad de congelación.

último, disminuía. Por ejemplo, en una probeta de 8,2 centímetros de diámetro, 50 mililitros de agua tardaban 25 minutos en congelarse cuando la temperatura inicial era de 25 grados, 32 minutos cuando comenzaban a 63 grados, pero solo 27 minutos cuando partían de una temperatura de 80 grados. En este caso, el agua a 80 grados se congelaba antes que el agua a 45 grados.

¿Se evapora el agua?

El riguroso planteamiento y la reputación de Walker sirvieron para cerrar el primer objeto del debate: no cabía duda alguna de la existencia del efecto Mpemba. Además, su trabajo abrió un camino para explicarlo: la evaporación del agua. En efecto, una fracción importante del agua caliente inicial se evapora durante el enfriamiento. Walker lo cuantificó en el 7 por ciento para el agua a 70 grados, y en más del 10 por ciento cuando el líquido se encontraba a 95 grados. Así, la masa de agua que debe enfriarse —y, por tanto, la cantidad de energía que debe extraerse— resulta tanto menor cuanto más elevada es la temperatura inicial. Ello explicaría la observación de Bacon y las prácticas canadienses en las pistas de patinaje.

Dado que la evaporación tiene lugar en la zona del agua que se encuentra en contacto con el aire, se comprende que la forma del recipiente influya en el efecto Mpemba. ¿Se reduce este entonces a una astuta curiosidad de feria? En absoluto: el efecto persiste en un recipiente cerrado. Por tanto, la pérdida de masa por evaporación no basta para explicarlo.

¿Hemos de renunciar a nuestra intuición física, según la cual rebajar hasta cero grados la temperatura del agua caliente requiere extraer más energía que en el caso del agua fría y, con ello, más tiempo para unas mismas condiciones de enfriamiento? Cuando el agua caliente se enfríe, llegará un momento en el que su temperatura igualará a la del agua fría. Por tanto, debería tardar más que esta en congelarse. ¿Dónde falla nuestro razonamiento?

En realidad, una vez que el recipiente se encuentra inmerso en una atmósfera gélida, la temperatura del agua ya no es homogénea. ¿Por qué? La densidad del agua depende de la temperatura: alcanza su valor máximo a cuatro grados Celsius. En los bordes del recipiente, el agua se enfría, cae al fondo y es reemplazada por agua más caliente, lo cual desencadena movimientos convectivos de gran amplitud. Estos favorecen sin duda la transferencia de calor y, seguramente, resultan de mayor importancia cuando la temperatura inicial del agua es elevada. Debido a esas heterogeneidades, el agua caliente y el agua fría experimentarán curvas de temperatura diferentes. En principio, ignoramos cuál de ellas será la más rápida.

Recurramos ahora a René Descartes, quien también escribió acerca de esta cuestión. En *Los Meteoros* consigna que el agua hervida, una vez se ha dejado enfriar a temperatura ambiente, se congela antes que el agua no hervida conservada a la misma temperatura. En 1916, el físico estadounidense F. C. Brown confirmó aquella observación: cuando ha sido hervida previamente, los tubos de vidrio llenos de agua y enfriados a menos de cero grados se rompen con mayor facilidad.

En busca de nuevas pistas

Hoy se atribuye ese comportamiento al diferente contenido en gas de los dos tipos de agua. Con el calor, se elimina gran parte de los gases disueltos en el líquido (oxígeno y dióxido de carbono, sobre todo). Parece que su presencia desempeña un papel importante, si bien muy poco conocido, en la solidificación del agua. En su experimento, Walker había empleado agua recién hervida. Dos años después, el inglés M. Freeman postuló que solo el agua saturada con gas carbónico podría mostrar el efecto Mpemba. En 1988, el polaco B. Wojciechowski y sus colaboradores sostuvieron, al contrario que Walker, que el agua no debía estar desgasificada.

Por otra parte, algunos aluden a un efecto de sobrefusión, por el cual el agua conservaría su estado líquido incluso cuando la temperatura disminuye por debajo de los cero grados. Sin embargo, numerosos experimentos registran precisamente el momento en el que la temperatura alcanza los cero grados, no aquel en el que se forma el hielo. El lector comprenderá que el efecto Mpemba se mofa de los físicos y los lleva a mal traer. Treinta años después del trabajo de Walker, ninguna explicación sólida ha visto la luz. ¿Puede que la experiencia resulte demasiado sensible a las condiciones de ejecución y que, por tanto, no pueda reproducirse con facilidad?



Bajo un frío intenso, las canalizaciones de agua caliente revientan con mayor facilidad que las de agua fría. En las paredes interiores de estas últimas se forma una capa de hielo, pero ello no impide la circulación del agua. En las tuberías de agua caliente, el agua se congela de manera desordenada y forma dendritas que obstruyen el conducto.

BRUNO VACARO

PARA SABER MÁS

El agua caliente se congela más aprisa que el agua fría. ¿Cómo es ello posible? J. Walker en *Investigación y Ciencia* n.º 14, noviembre de 1977.
The Mpemba effect: When can hot water freeze faster than cold? M. Jeng en *American Journal of Physics*, 2006.

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.



Colecciones no medibles

El conjunto de Vitali: una introducción a la teoría de la medida

Imagínese frente a una línea de longitud finita. ¿Qué procedimiento podríamos utilizar para elegir, de manera totalmente aleatoria, un punto de esa línea? Dado que siempre podemos representar nuestra línea como el conjunto [0,1] (aquel formado por los números reales x tales que $0 \leq x \leq 1$), nuestro problema resulta equivalente a hallar un método para elegir de manera aleatoria un número en el intervalo [0,1].

He aquí una posibilidad. Todos sabemos que los números reales pueden representarse en notación decimal. Sin embargo, un método más sencillo para nuestros fines consiste en emplear el sistema binario. Por ejemplo, 1/2 en notación binaria se escribe 0,1; y 1/6 queda representado por 0,00101(01) (los paréntesis indican la repetición periódica de las cifras correspondientes). También los números irracionales pueden escribirse en binario: π–3 equivale a 0,00100100001111110110..., etcétera. En general, la expresión binaria $0{,}d_1d_2d_3\ldots$ representa el número $d_1/2^1 + d_2/2^2 + d_3/2^3 + \cdots$.

Una vez que sabemos cómo escribir cualquier número perteneciente a [0,1] en notación binaria, resulta muy sencillo establecer un método para seleccionar uno de ellos de manera aleatoria. Consideremos una secuencia infinita de lanzamientos de moneda. Cada vez que la moneda caiga cara, anotaremos un 0; cuando salga cruz, apuntaremos un 1. El resultado será una secuencia infinita de ceros y unos, la cual corresponderá siempre a un número en [0,1]. ¿Cuál? Aquel cuya representación binaria consista en un cero seguido de una coma y de la secuencia de ceros y unos dictados por los infinitos lanzamientos de moneda. Si estos resultaran en la serie 00101(01), nuestro método habrá seleccionado, de manera completamente aleatoria, el número 1/6.

Sobra decir que nuestra táctica jamás podría ser llevada a la práctica. ¡Nadie puede lanzar una moneda infinitas veces! Para completar el proceso en un tiempo finito, deberíamos arrojar la moneda cada vez más rápido: por ejemplo, tendríamos que efectuar el primer lanzamiento a las 11:00, el segundo a las 11:30, el tercero a las 11:45, etcétera. Así completaríamos el proceso antes del mediodía. Con todo, lo que importa para nuestros propósitos no es tanto disponer de un método práctico, cuanto de uno bien definido que nos asegure que tiene sentido afirmar que hemos elegido un punto en [0,1] de manera completamente aleatoria.

Nótese que nuestro método implica que la probabilidad de elegir un número concreto (1/2, 1/6, π–3 ...) es siempre nula. Por supuesto, ello no significa que resulte *imposible* obtener la secuencia asociada a un número dado, sino que la probabilidad de obtener una serie concreta es tan diminuta que ningún número real puede cuantificarla. Supongamos que la probabilidad de obtener la secuencia correspondiente a π–3 fuese igual a ε, donde ε representa un número real pequeñísimo, pero mayor que cero. En ese caso, deberíamos concluir que el método de la moneda selecciona el número π–3 una de cada 1/ε veces (en promedio), lo cual es falso.

Un hecho curioso es que mientras que los números irracionales cuentan con una sola representación en notación binaria, hay números racionales que poseen dos. El número 1/2, por ejemplo, puede escribirse como 0,1000(0), pero también como 0,01111(1). Por tanto, aunque existe una sola secuencia de lanzamientos de moneda que arroja el número π–3, hay dos series posibles asociadas al número 1/2. Eso no cambia, sin embargo, el hecho de que la probabilidad de obtener 1/2 con el método de la moneda sea cero.

Nuestro proceso de selección nos permite establecer otras conclusiones interesantes. Por ejemplo, que la probabilidad de escoger un número igual o menor a 1/2 es exactamente 1/2: un 50 por ciento. La manera más simple de verlo consiste en notar que, con el método de la moneda, obtendremos un resultado igual o menor a 1/2 en solo dos circunstancias: si el primer lanzamiento cae cara (un evento de probabilidad 1/2) o si en el primero obtenemos una cruz y, a partir de ese momento, solo caras: un evento de probabilidad 0. De manera más general, nuestro método implica que la probabilidad de que el número elegido pertenezca a un intervalo de longitud k viene dada por k.

Probabilidades inexistentes

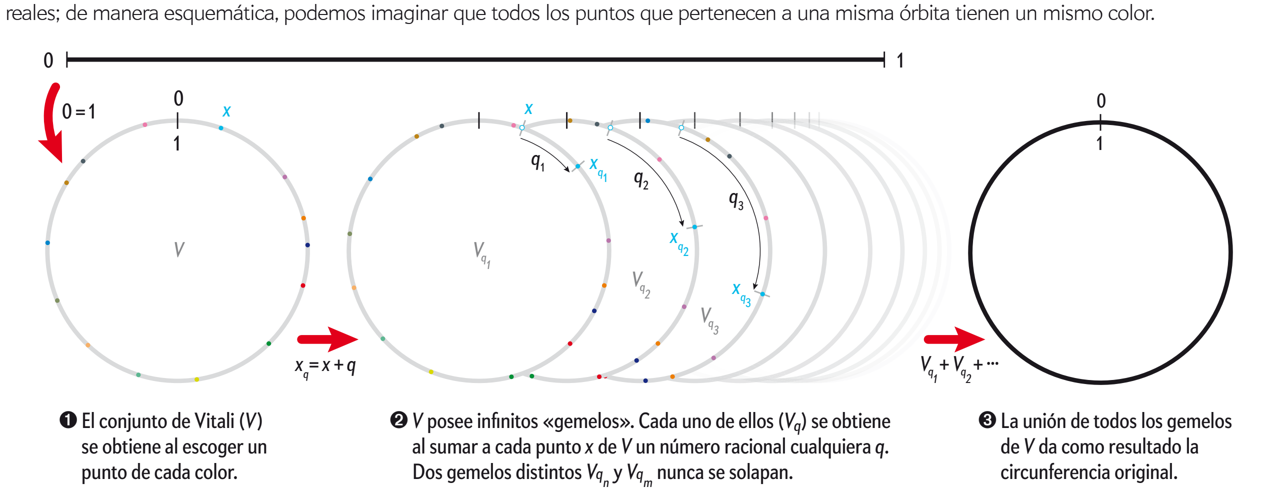
Resulta tentador pensar que, para cualquier subconjunto S de [0,1], habrá siempre una probabilidad bien definida de que el método de la moneda nos dé un número perteneciente a S. Trágicamente, tal afirmación es falsa.

El ejemplo clásico fue identificado por el matemático italiano Giuseppe Vitali en 1905. Por *conjunto de Vitali* se conoce cierto subconjunto V de [0,1] que posee la desconcertante propiedad de ser *no medible*. De manera intuitiva, podemos entender la medida, o «tamaño», de un subconjunto de [0,1] como el «porcentaje» de puntos en [0,1] que pertenecen también al subconjunto en cuestión. Con esta definición, la medida del conjunto [0,1/2] ascendería a 1/2, mientras que la de un conjunto formado por un único punto sería nula. El hecho de que V sea no medible significa que jamás podremos decir qué porcentaje de puntos de [0,1] se encuentra ocupado por V. Por tanto, también carecerá de sentido intentar cuantificar la probabilidad de que el método de la moneda arroje un número en V.

La caracterización de V resulta sorprendentemente sencilla. Primero, si a y b denotan dos números en [0,1], diremos que pertenecen a la misma *órbita* si $a - b$ es un número racional. Por ejemplo, 1/2 y 1/6 se encuentran en la misma órbita, ya que 1/2 – 1/6 = 2/3 (un número racional). Sin embargo, 1/2 y π–3 no están en la misma órbita, pues su diferencia es un número irracional. Puede demostrarse que exis-

EL CONJUNTO DE VITALI

La recta de los números reales comprendidos entre 0 y 1 puede doblarse sobre sí misma hasta formar una circunferencia. En ella, diremos que dos números *a* y *b* pertenecen a una misma órbita (son «equivalentes») si *a* – *b* es un número racional. Existen tantas órbitas distintas como números reales; de manera esquemática, podemos imaginar que todos los puntos que pertenecen a una misma órbita tienen un mismo color.



❶ El conjunto de Vitali (*V*) se obtiene al escoger un punto de cada color.

❷ *V* posee infinitos «gemelos». Cada uno de ellos (V_q) se obtiene al sumar a cada punto *x* de *V* un número racional cualquiera *q*. Dos gemelos distintos V_{q_n} y V_{q_m} nunca se solapan.

❸ La unión de todos los gemelos de *V* da como resultado la circunferencia original.

ten tantas órbitas distintas como números reales. Por último, el conjunto de Vitali se obtiene al elegir un elemento de cada órbita. (La aseveración de que dicho conjunto existe no es en absoluto trivial: presupone el axioma de elección, un principio de consecuencias sorprendentes.)

¿Por qué resulta imposible asignar una medida a *V*? El problema reside en que *V* pertenece a una familia de subconjuntos «gemelos» que deberían tener todos la misma medida. Pero, como veremos, existen razones de peso que nos impiden asignar un valor a dicha medida común.

El modo más sencillo de entender cuáles son los gemelos de *V* consiste en «doblar» la línea representada por [0,1] y unir sus extremos para formar una circunferencia. Ahora, para cada número racional q perteneciente a [0,1], definiremos el gemelo V_q de *V* como el conjunto que se obtiene al trasladar cada punto x de *V* una distancia q sobre la circunferencia.

Notemos, en primer lugar, que *V* tiene infinitos gemelos: uno por cada número racional perteneciente a [0,1]. Además, en caso de poder asignar una medida a *V*, esa debería ser también la medida de todos sus gemelos, ya que cada uno de ellos se obtiene desplazando los puntos de *V* una distancia constante sobre la circunferencia, una operación que no cambia el tamaño del conjunto.

La definición de *V* nos garantiza que el conjunto formado por todos sus gemelos V_q constituye una *partición* de [0,1]: es decir, que todo punto de [0,1] se encuentra en algún gemelo, y que la intersección de dos gemelos es siempre el conjunto vacío (o, en otras palabras, que dos gemelos nunca se solapan). Sabemos también que los V_q constituyen una partición numerable de [0,1], ya que hay tantos V_q como números racionales en [0,1].

Uno de los axiomas de la teoría de la medida afirma que siempre que tengamos una partición numerable de un conjunto *C*, la medida de *C* debe ser igual a la suma de las medidas de los subconjuntos que componen la partición. Por tanto, si a cada uno de los gemelos le asignásemos medida cero, la medida del intervalo [0,1] también debería ser cero. Pero si cada uno de los gemelos tuviese una medida finita (digamos ε, por pequeña que esta fuese), la medida de [0,1] tendría que ser infinita. ¡Pero queremos que [0,1] tenga medida uno! Es imposible, por tanto, asignar una medida a los gemelos de *V*. Dado que uno de esos gemelos es el propio *V* (porque $V = V_0$), podemos concluir que resulta imposible asignar una medida a *V*.

Nos encontramos ante una situación insólita. Hemos visto que existe un subconjunto *V* de [0,1] tal que carece de sentido preguntarse qué «porcentaje» de [0,1] pertenece a *V*. Pero, si esto es cierto, tampoco puede estar bien definida la probabilidad de que el método de la moneda dé como resultado un elemento de *V*.

¿Un experimento al rescate?

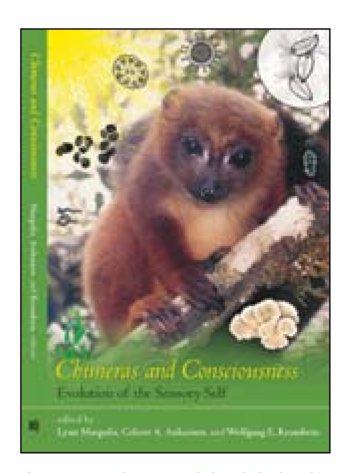
¿Qué ha ocurrido? ¿Cómo es posible que *no exista* tal cosa como la probabilidad de que el método de la moneda nos dé un elemento de *V*? ¿No podríamos determinar dicha probabilidad de manera empírica? ¿Qué sucedería si aplicásemos el método de la moneda una infinidad de veces y contásemos el número de ocasiones en las que obtenemos un número perteneciente a *V*? ¿No obtendríamos así la probabilidad que estábamos buscando?

Por desgracia, no. Supongamos que llevamos a cabo el experimento. Seguramente obtendremos un elemento perteneciente a *V* en infinitas ocasiones, y uno fuera de *V* también en una infinitud de casos. Sin embargo, ello no basta para concluir que la probabilidad de obtener un número en *V* asciende al 50 por ciento. De ser así, deberíamos concluir que la probabilidad de obtener un número en el intervalo [0,1/6] es también del 50 por ciento.

Para determinar la probabilidad de que el método de la moneda arroje un número en *V* no basta con saber que hay infinitas ocasiones en las que el experimento arroja un número en *V*, e infinitas en las que no lo hace. Necesitamos una medida: un método para calcular el «porcentaje» de veces en las que el experimento da como resultado un número en *V*. Sin embargo, el mismo razonamiento que nos permitió deducir que era imposible determinar qué fracción de [0,1] es ocupado por *V* nos aboca a la conclusión de que es imposible determinar el porcentaje de ocasiones en las que el experimento de la moneda arrojará un número en *V*.

PARA SABER MÁS

La prueba del teorema de Vitali utiliza un supuesto nada obvio: que siempre que tengamos una partición numerable de un conjunto *C*, la medida de *C* debe ser igual a la suma de las medidas de los subconjuntos de los que se compone dicha partición. Puede encontrarse una buena discusión al respecto en **Statistical implications of finitely additive probability**, por J. B. Kadane, M. J. Schervish y T. Seidenfeld en *Bayesian inference and decision techniques*, dirigido por P. K. Goel y A. Zellner, Elsevier, 1986.



CHIMERAS AND CONSCIOUSNESS. EVOLUTION OF THE SENSORY SELF,

dirigido por Lynn Margulis, Celeste A. Asikainen y Wolfgang E. Krumbein. The MIT Press; Cambridge, Mass., 2011.

Identidad biológica

Lo vivo frente al medio

Quizá la vida no emergió de una sopa primordial. Tal vez sea, en su origen y evolución, un proceso de desarrollo que depende del flujo de materia y energía. La luz pudo inducir la aparición de los sistemas constituyentes de las células y estabilizar sus estados dinámicos. Los experimentos sobre el origen, desde los famosos de Stanley Miller y Harold Urey, han rendido formaldehído, azúcares simples y polímeros derivados del cianhídrico, incluido ATP (compuesto intracelular de almacenamiento de energía), precursores de pirimidinas y lípidos. Para la formación de la vida no se requirió, tal vez, un almacén preexistente de información. A medida que el sistema emergente fue creciendo secuencialmente, la información se iría acumulando en la estructura. Solo después de que apareciese la célula se codificó la información en ADN.

Las primeras células implicaban un metabolismo energético y flujo de materia. Los procariotas, con solo unos pocos aminoácidos en su ciclo energético de compuestos fosfato de altas energías, establecieron hipotéticamente el primer metabolismo celular. La síntesis de coenzimas condujo a las células a una mayor complejidad. Existe una progresión químicamente lógica que nos llevó hasta las primeras células, las formas de vida más antiguas que implicaban metabolismo energético y flujo de materia. Los genes y sus proteínas evolucionaron en el interior de esos sistemas metabólicos pioneros: las bacterias o células procariotas. Con el tiempo, los sistemas metabólicos y genéticos se integraron plenamente y nació la célula bacteriana moderna.

La primera entidad metabólica que iniciaba el linaje que condujo al último antepasado común o universal (LUCA, de *last universal common ancestor*) evolucionó en el interior de las células bacterianas. La síntesis de las macromoléculas características de la vida (proteínas y ácidos nucleicos) fue probablemente la última innovación bioquímica importante. El sistema genético moderno, con su ADN, su ARN mensajero y la síntesis de proteínas, evolucionó a través del mismo proceso de desarrollo metabólico, paso a paso, con un flujo de material promovido por energía. Se requerían ATP, los nucleótidos y los aminoácidos de proteínas, ninguno de los cuales se producen directamente a partir de los genes. El interior celular fue un rico medio de moléculas en interacción, protegidas de una dispersión entrópica. La vida habría iniciado su andadura después de que los veinte aminoácidos se hubieran adquirido por evolución.

Algunas de las moléculas del proceso originario de desarrollo se hallan íntimamente relacionadas con la sensibilidad ante el medio exterior. Merece destacarse la conservación del adenosín monofosfato cíclico, una hormona social relacionada con la sensación y la acción. Las raíces de la sensación se encuentran en una antigua familia de moléculas, las alarmonas, derivadas de ribonucleótidos y activadas cuando las células sufren sed, hambre y otras amenazas del medio. Las alarmonas, análogas de las hormonas vegetales y animales, ayudan a conformar las comunidades microbianas. Los procariotas presentan unos sistemas sensoriales elaborados que les facultan un seguimiento cabal de su entorno y unas respuestas adecuadas. Las primitivas formas de la vida adquirieron, en el curso de la evolución, receptores que registraban las condiciones del medio; descubrieron claves de las señales químicas intracelulares y extracelulares. El ARN registraba y detectaba metabolitos antes de que advinieran las proteínas.

Las condiciones de estrés son detectadas por las alarmonas, pequeños metabolitos que se sintetizan rápidamente cuando se produce una situación de hambruna. Las alarmonas son compuestos relativamente sencillos constituidos por vías biosintéticas modificadoras de nucleótidos. En razón de su tamaño mínimo y naturaleza química, las alarmonas no sirven para construir filogenias. Sin embargo, su historia evolutiva puede reconstruirse comparando la distribución y filogenia de las enzimas implicadas en su biosíntesis. La transferencia lateral de genes obstaculiza la reconstrucción de la evolución biológica inicial. Las secuencias implicadas en la biosíntesis de las alarmonas no ha sido una excepción.

Las células más pequeñas, morfológicamente más sencillas, las bacterias en sentido amplio, se unificaron bajo el término procariotas a comienzos de los años sesenta del siglo pasado. Los procariotas no encierran su ADN dentro de una membrana nuclear. Los procariotas responden a un conjunto sorprendentemente nutrido de variables del medio y a sus cambios: luz, temperatura, salinidad, disponibilidad de fuentes de energía, aceptores de electrones, composición de oxígeno y de otros gases, campos magnéticos, moléculas informativas específicas (las mencionadas alarmonas), que actúan como hormonas o como señales. En esas respuestas las bacterias muestran sus limitaciones. Los animales tienen sensores para el gusto, el agua, la salinidad, la temperatura, el sabor, el dolor o el sonido. Las respuestas procariotas tienden a ser menos localizadas y más directas. Las bacterias se encaminan raudas hacia el estímulo, o se apartan del mismo con semejante celeridad. Las bacterias detectan la estimulación mecánica, la luz y los gradientes químicos y energéticos. Se mueven, o se alejan, de las altas intensidades de luz, bajas concentraciones de oxígeno o toxinas. Se alteran unas a otras y forman grupos que difieren de los individuos que las constituyen. Vastas poblaciones de tipos mixtos de bacterias alteran drástica y persistentemente el entorno inmediato.

La activación o inhibición de genes específicos en respuesta a los estímulos constituye a menudo la forma en que se detecta la sensibilidad. Las bacterias se muestran vigilantes ante el medio: sienten y responden a los estímulos. La quimiotaxis, el movimiento de los procariotas en razón del gradiente químico. Son conocidas la atracción y la repulsión. Son conocidas las mixobacterias, que se aprovechan de las señales quimiotácticas para descubrir su presa. Las bacterias desarrollaron una plétora de diferentes modos de energía utilizando gradientes químicos (desequilibrios entrópicos) que convierten compuestos inorgánicos de alta entropía (por ejemplo, CO_2) en moléculas orgánicas sustentadoras de vida

y baja entropía, como los ácidos orgánicos, aminoácidos incluidos, que son precursores de las proteínas.

La sensibilidad de la vida a la cantidad y salinidad del agua pudiera constituir el más elemental de todos los sentidos. Plantas, animales, hongos y todos los microorganismos sufren la sed y buscan la humedad. La vida es sensible a los niveles locales de agua. La universalidad de la detección del agua y la respuesta de las células a ese solvente ubicuo parece residir en las propiedades de su membrana lipoproteica. Esta membrana, denominada bicapa semipermeable, ha sido el límite externo intacto de las células de todos los tiempos. Esta membrana confiere identidad. La estimulación mecánica, el simple plegamiento de la membrana, bloquea o libera el flujo, a través de la misma, de los iones en el agua.

La palabra «quimera» remite al ser mitológico que mezclaba partes de distintos animales. El término ofrece una doble connotación: por un lado, designa algo cuestionable, mítico e imaginario (quimérico) y, por otro, una feliz combinación de dos o más seres distintos. Posee, además, significado propio en diversos campos. En genética animal se refiere al individuo con células genéticamente distintas (por ejemplo, el individuo resultante de la fusión de un óvulo con dos espermatozoides). En el comienzo de la evolución celular se fusionaron eubacterias con arqueobacterias. De la fusión de ambos tipos surgieron los protoctistas. Las espiroquetas alcanzaron un éxito insólito en su unión y fusión con arqueobacterias en mohos ricos en sulfuro. Se habla con fundamento del origen quimérico del sistema inmunitario.

A menudo surgen quimeras con los virus. Los virus, aunque carentes de yo propio, producen enfermedades, colapsan el sistema inmunitario y pueden conducirnos a la muerte. Los virus precisan introducirse en células activas para poder realizar algo. Fuera de las células son como cristales de sal; por sí solos, no pueden reproducirse, ni digerir ni crecer. Pero muchos, instalados en el interior celular, ayudan a asegurar la continuidad de la salud; merced a ellos, ciertas bacterias aportan nutrientes a los animales. Doquiera se han buscado, sean en los procariotas o en los eucariotas, se han encontrado virus. Los virus son de ADN o de ARN. Se encierran dentro de una cubierta proteica, o cápside, y contienen genes codificadores de algunas enzimas (integrasa y polimerasas de ADN o de ARN). Alteran la evolución de los organismos donde residen (bacterias, protoctistas, animales, vegetales y hongos), mediante la incorporación de sus genes en las células reproductoras. Por no citar la impronta que han dejado en nuestro genoma. Por consiguiente, pese a estar privados de identidad, de yo, son fundamentales para las fusiones genéticas a través de linajes de taxones dispares.

—Luis Alonso



IMPREGNACIONES METÁLICAS. ATLAS FOTOMICROGRÁFICO DE ESTRUCTURAS SUBCELULARES, CÉLULAS Y TEJIDOS ANIMALES,

por Patricia Rivas Manzano. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias; México, 2010.

Impregnaciones

Técnicas histológicas

Para conmemorar el centenario de la concesión del Nobel de medicina y fisiología a Santiago Ramón y Cajal (1906), Patricia Rivas, de la Universidad Nacional Autónoma de México, se rodea de colaboradores, profesores y alumnos a los que expone su idea: seleccionar preparaciones de diversos órganos animales y someterlos a una elevada gama de técnicas de impregnaciones con sales de metales pesados, como los utilizados por Ramón y Cajal y sus discípulos (Río Hortega, Tello y De Castro, entre otros).

En el inicio de la obra (agradecimientos), nos enteramos de que existe una escuela hispano-mexicana de impregnaciones argento-áuricas, entre cuyos maestros destacan Isaac Costero Tudanca, autor del segundo capítulo de este libro, sobre las estructuras que él denomina subcelulares.

Acostumbrados los histólogos a consultar atlas de histología normal y patológica cuya iconografía está formada en su mayoría por magníficas imágenes obtenidas de preparaciones teñidas con la doble tinción hematoxilina-eosina, y el resto por imágenes microscópicas procedentes de preparaciones teñidas con otros métodos (Mallory, PAS, hematoxilina férrica, inmunofluorescencia y alguna impregnación en nitrato de plata, según Cajal), nos encontramos aquí con una obra profundamente ilustrada con imágenes de preparaciones sometidas a las delicadas y aleatorias impregnaciones metálicas, que en muchos casos nos ofrecen una información adicional a la obtenida con las tinciones más estándar realizadas con colorantes de anilina, aparte de la anteriormente mencionada hematoxilina (de origen natural).

Los métodos de impregnación con sales de metales más o menos pesados empezaron a aplicarse a mediados del siglo XIX (Bielschowsky, Simarro, Golgi, Ramón y Cajal) y se han continuado utilizando a lo largo del siglo XX y en la actualidad (Tello, Del Río Hortega, Fernando de Castro, Llombart) por numerosos neurobiólogos que investigan en las universidades, en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en centros hospitalarios. A las técnicas clásicas se han sumado las de inmunofluorescencia y otras de marcaje específico de componentes celulares, así como digestiones enzimáticas, técnicas combinatorias de microscopía óptica y electrónica. En este sentido, los ensayos no cesan de sucederse y ofrecemos detalles intuidos pero no puestos de manifiesto hasta la actualidad.

Las técnicas de impregnaciones metálicas son ciertamente complejas dada su aleatoriedad. Sobre los resultados obtenidos al aplicar cualquier técnica influyen —al margen de la pericia del operador— varios condicionantes: la marca de los reactivos, su pureza (en ocasiones, dos envases de la misma marca pueden no ser

exactamente iguales), la fecha de preparación de los mismos (algunos deben prepararse con semanas de antelación y someterlos a algún proceso de maduración; otros, por el contrario, tienen que prepararse al momento), la calidad del agua (suele trabajarse con agua bidestilada), el tiempo de aplicación del reactivo sobre el corte, el grosor de este, la manipulación, el montaje final de la preparación, etcétera. El principiante no calibra la importancia de estos detalles. Dichos condicionantes también se dan en las técnicas de tinción con colorantes de anilina, pero al no ser tan sensibles, las preparaciones obtenidas presentan menor variabilidad. El resultado de las impregnaciones metálicas es más aleatorio.

Las ilustraciones del atlas que aquí reseñamos proceden en su mayor parte de preparaciones impregnadas con el método de Del Río Hortega, con o sin posterior viraje. Algunas corresponden a imágenes obtenidas con ciertas variantes de la técnica del nitrato de plata reducido de Cajal; otras, muy pocas, con el método de Golgi-Kopsch; unas cuantas impregnaciones con cloruro de oro según el método de Ruffini, y diversas según el de Llombart, así como la impregnación de Ploton para visualizar con gran resolución el organizador nucleolar.

La parte final está dedicada a la metodología para preparar los diversos reactivos empleados en la obra. Termina con una relación bibliográfica en la que encontramos a faltar la cita de trabajos clave de los grandes histólogos de la escuela cajaliana.

Las impregnaciones metálicas no resaltan solo los elementos nerviosos (nervios, sinapsis, corpúsculos sensitivos). Resuelven también numerosos compartimentos celulares: núcleo y nucleolo, aparato de Golgi, mitocondrias, secuencia de corpúsculos basales de cilios de los epitelios vibrátiles, centríolos, así como las barras de cierre y los nódulos de Bizzorezzo. (Cabe señalar que existen adaptaciones a algunas de las impregnaciones metálicas para efectuar estudios ultraestructurales.)

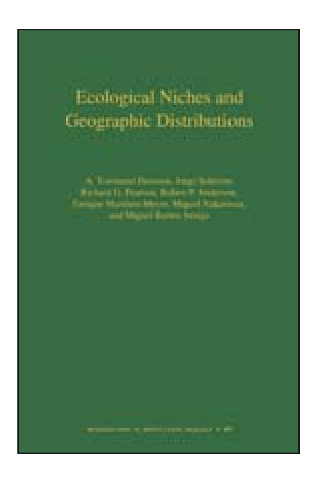
En la entrada del segundo capítulo de esta obra, Isaac Costero escribe: «La técnica argéntica es un método de trabajo complejo, versátil y un tanto caprichoso para el que se necesita acopio de paciencia, provisión inagotable de interés personal, suma de habilidades, espíritu hipersensible a la intuición, inspiración filosófica, arca de entusiasmo y disciplina férrea resistente a los fracasos».

Estas apasionadas consideraciones constituyen una adaptación, elaborada con otros términos, pero con el mismo significado, de diversas observaciones que Santiago Ramón y Cajal ofrece en su *Tónico de la voluntad*, subtítulo de *Reglas y consejos sobre investigación científica*, magnífico discurso de ingreso a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Madrid, 1897); un texto de gran vigencia.

Dado que esta obra ha sido elaborada para conmemorar el centenario de la concesión del Nobel de medicina y fisiología, me parece oportuno compartir lo que relata Ramón y Cajal en su autobiografía cuando acude por primera vez a Berlín, donde se celebra una reunión de la Sociedad Anatómica (1889). Kölliker, científico que lideraba la histología alemana y mundial, le dice a Cajal al observar las preparaciones que este le enseña: «Los resultados obtenidos por usted son tan bellos que pienso emprender inmediatamente, ajustándome a la técnica de usted, una serie de trabajos de confirmación. Le he descubierto a usted, deseo divulgar en Alemania mi descubrimiento». Efectivamente, ¡cumplió con su palabra!

Muchos han sido y serán los científicos que han estudiado y divulgado la gran obra cajaliana. Este atlas ofrece una muestra de ello.

—Mercè Durfort
Universidad de Barcelona



ECOLOGICAL NICHES AND GEOGRAPHIC DISTRIBUTIONS,

por A. Townsend Peterson, Jorge Soberón, Richard G. Pesarson, Robert P. Anderson, Enrique Martínez-Meyer, Miguel Nakamura y Manuel Bastos Araújo. Princeton University Press; Princeton, 2011.

Ecología fundamental

Sobre el concepto de nicho

Los campos de la biogeografía histórica y biogeografía ecológica habían venido avanzando por separado y alejados uno del otro, con terminología, conceptos e investigadores diferentes. La biogeografía ecológica se centra en las pautas espaciales que siguen las comunidades ecológicas en su composición y funcionamiento, mientras que la biogeografía histórica atiende a la reconstrucción de la historia de las áreas y de sus biotas. Aunque en los últimos años se han acercado algo los dos campos, persisten distantes y sin conexión. De esa situación se ha resentido nuestra comprensión espacial de la biodiversidad.

Difiere una biogeografía de la otra en la escala espacial. La ecológica trabaja a escalas regionales, en tanto que la histórica lo hace a escala continental e incluso global. Divergen también en la consideración temporal. La biogeografía ecológica opera en intervalos geológicamente instantáneos (es decir, en el presente), mientras que la histórica considera desde el presente hacia atrás en el tiempo evolutivo, a veces millones de años. Han empezado a aparecer investigaciones que tienden puentes, en un empeño por construir una biogeografía más sintética. Ambos campos tienen mucho que decir sobre la geografía de la biodiversidad.

Se ha producido un crecimiento exponencial de datos sobre biodiversidad con la digitalización de los recursos. Se estiman entre unos 1000 y 3000 millones de especímenes los existentes en museos y herbarios de todo el mundo. Se dispone, asimismo, de abundante información sobre variables ambientales: clima, topografía, suelos, parámetros oceanográficos, índices de vegetación, reflectancia de la superficie terrestre, etcétera. Además, se han creado poderosos programas informáticos que facilitan la estimación de las áreas de distribución y de los objetos teóricos relacionados con nichos. Esas herra-

mientas nos permiten, en particular, obtener una modelización de la distribución de especies, así como una modelización del nicho ecológico.

Se señala a menudo que bajo el término «nicho» se amparan ideas muy dispares. Ante semejante equivocidad, algunos desearían dejar abierta su definición. Pero en ciencia se avanza cuando se emplean de forma precisa y coherente los conceptos clave. Además, las diferentes acepciones de nicho corresponden a distintos problemas biológicos. En un comienzo, los ecólogos aplicaron el término a analizar una cuestión muy compleja: qué combinaciones de factores ambientales permiten que una especie exista en una región geográfica dada o en determinada comunidad biótica, y qué efectos ejerce la especie sobre tales factores ambientales.

En 1917, Joseph Grinnell, en su ensayo *The niche-relationships of the California thrasher*, donde estudiaba el nicho de la especie *Toxostoma redivivum* con relación a su área de distribución, entendía por nicho las exigencias climáticas y de hábitat de ese mímido (factores ambientales), expresados geográficamente. Diez años más tarde, Charles S. Elton, en *Animal Ecology*, asimilaba la idea de nicho a la función que cumplía un animal sobre una comunidad (sus efectos locales); la existencia se daba por descontada y el énfasis se ponía sobre el impacto ejercido. Dos enfoques contrapuestos, que marcaron pautas. Para G. Evelyn Hutchinson (*Concluding remarks*, 1957), un nicho fundamental de una especie era un hipervolumen de variables ambientales; cada punto de ese volumen correspondía a un estado del entorno que permitiría a la especie existir indefinidamente.

Tras revisar la historia del concepto de nicho, J. M. Chase y M. A. Leibold (*Ecological niches: Linking classical and contemporary approaches*, 2003), llegaron a la conclusión de que buena parte de la confusión reinante en torno al término nicho obedecía a que los autores no distinguían entre las respuestas de los organismos a su entorno y los efectos de los organismos sobre el mismo. Tal diferencia acarreaba profundas implicaciones sobre la forma matemática real de una definición de nicho multivariada y graves consecuencias operacionales, puesto que las variables relacionadas con las exigencias pueden medirse sin dificultad, mientras que las vinculadas al impacto suelen requerir ensayos experimentales ad hoc.

El entorno de una especie consta de factores muy dispares. Encontramos factores ambientales que se hallan vinculados a la población de la especie y otros que no lo están; en otras palabras, variables que describen aspectos ambientales que reciben el impacto de la especie (por consumo y otras modificaciones) y variables que pueden repercutir en la adaptación de la especie. De la necesidad de distinguir entre variables dinámicamente ligadas (los recursos) y condiciones no ligadas se percató ya Hutchinson en *An introduction to population ecology* (1978), reseñado en su momento en estas mismas páginas por Ramón Margalef. Hutchinson llamó la atención sobre las profundas diferencias entre variables escenopoéticas, que ni se consumen ni son disputadas, y variables binómicas, que sí se consumen y son objeto de disputa. A los espacios multidimensionales de variables escenopoéticas que existen en una región dada y en tiempo determinado se acostumbra a denominarlos «E-espacios».

Con anterioridad, en 1973, R. B. Root, R. H. Whittaker y S. A. Levin, en su trabajo *Niche, habitat, and ecotope*, al examinar el significado y la función de nicho, pensaron en un entorno multidimensional compuesto de las variables nicho (con el sentido de función) y «hábitat» (con el de lugar) que se corresponden de forma aproximada con las variables binómicas y esceopoéticas de Hutchinson. A ese espacio lo denominaron «ecotopo». Pickett, Bazzaz y Silvertown desarrollaron la idea de nichos alfa, beta y gamma. Proponían una jerarquía de definiciones de nicho basadas en las escalas en que operan los procesos ecológicos; el nicho alfa sería la región de un nicho de escala local donde se desarrollan las interacciones entre especies. El beta es la región de un nicho de especies correspondiente al hábitat en que se encuentra. Por fin, el gamma designa el ámbito geográfico de la especie.

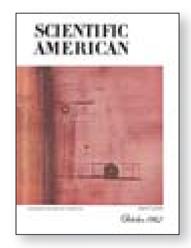
Hoy se tiende a considerar que el significado principal de nicho es explícitamente geográfico en su naturaleza, basado en E-espacios compuestos de variables escenopoéticas tomadas como condiciones o requerimientos. Se trata de nichos «grinnellianos», que se definen por variables ambientales abióticas o cenopoéticas y condiciones ambientales a gran escala. Grinnell mezcló aspectos de la hipótesis de la «función» y de la hipótesis del «lugar», variables escenopoéticas y binómicas. Esa opción preferente no deja de lado otras acepciones, en particular las orientadas hacia las cuestiones poblacionales, a escalas locales o que incluyan modelos de consumo e impacto. A esta escala y significado remite la expresión «nicho eltoniano», que acentúa los atributos funcionales de los animales y su correspondiente posición en la cadena trófica. En ese debate resulta crítica la relación entre espacios ambientales y espacios geográficos. Mediante la definición de un espacio geográfico (G-espacio), a una resolución dada, y un punto particular en el tiempo, y mediante la intersección de esa área con capas de datos digitales sobre el entorno, podemos extraer subconjuntos del E-espacio existente que correspondan a diferentes regiones del G-espacio.

Los modelos de nicho ecológico se construyen a partir de la información procedente de una doble fuente: presencia conocida de la especie de interés y predictores ambientales. ¿Cuáles y cuántas variables son necesarias para construir un modelo de nicho ecológico? La respuesta depende de la escala en que estemos trabajando, del conocimiento disponible sobre la autoecología de la especie en cuestión, la complejidad del nicho ecológico de la especie y la disponibilidad de datos de calidad. Se requiere, asimismo, desentrañar las distribuciones ecológicas y geográficas a escalas más finas. Y manejar una combinación de variables escenopoéticas y binómicas que cubrieran aspectos del microclima, estructura del hábitat, suministro de recursos, densidad de competidores, radiación solar y otros parámetros. A escala intermedia, se precisaría disponer de las características del terreno y fenología de la vegetación. A escalas mayores (de regionales a globales), predominarían las variables escenopoéticas.

En el campo de la modelización del nicho ecológico, las especies invasoras revisten un interés particular. Las especies invasoras son un fenómeno global con consecuencias de largo alcance, lo mismo en biología que en economía. En economía humana, las especies invasoras afectan a la productividad agrícola, los sistemas de transporte, los sistemas de comunicación, la transmisión de enfermedades, la pesca recreativa, la caza. En otro orden, a medida que los métodos de modelización y comprensión de los nichos ecológicos y la distribución geográfica de las especies han ido adquiriendo creciente robustez, los biólogos evolutivos han ido concediéndoles mayor atención. Al fin y al cabo, la biogeografía y la variación genética inciden en el nicho ecológico.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Octubre 1962

Crick y el código genético

«Los ácidos nucleicos resultan de la unión de nucleótidos de cuatro tipos en una cadena polinucleótida. Esta brinda un armazón del que sobresalen, a intervalos regulares, los cuatro grupos laterales conocidos como bases. El orden de las bases, sin embargo, no es regular; es precisamente dicha secuencia lo que se cree que conforma el mensaje genético. El problema de la codificación, por tanto, queda formulado de modo más explícito si decimos que consiste en averiguar de qué manera la secuencia de las cuatro bases en el ácido nucleico determina la secuencia de los veinte aminoácidos en la proteína.

—F. H. C. Crick»

Crick recibió el premio Nobel de medicina en 1962 por sus trabajos de 1953.

Disonancia cognitiva

«Cuando dos informaciones no encajan bien psicológicamente, se dice que guardan entre sí una relación disonante. Dichas informaciones pueden referirse a comportamientos, sensaciones, opiniones, cosas del entorno, etcétera. El adjetivo "cognitivo" simplemente recalca que la teoría trata sobre la relación entre elementos de información. Estos, desde luego, pueden modificarse. Una persona puede cambiar de opinión; puede también mudar de conducta, con lo que cambiará la información que posee acerca de ella; puede incluso deformar su percepción y su información acerca del mundo que la rodea. Los cambios de información que producen o restauran la coherencia se denominan cambios reductores de la disonancia. La disonancia cognitiva constituye un estado motivador. Al igual que el hambre impulsa a una persona a comer, la disonancia cognitiva la impulsa a cambiar de opiniones o de comportamiento.

—Leon Festinger»

Octubre 1912

Bacterias contra langostas

«En un plazo de dos años, una epidemia bacteriana ha liberado Yucatán de los enjambres de langostas que periódicamente invadían el país. La enfermedad dura de 12 a 46 horas y se caracteriza por una violenta diarrea; el contenido de las entrañas de los insectos produce un cultivo microbiano casi puro. El microbio ha sido aislado por M. Félix d'Hérelle, quien examina sus efectos patológicos específicos en una memoria presentada a la Academia Francesa de las Ciencias. Ahora, M. d'Hérelle, a quien el Gobierno argentino había pedido que ensayase los efectos del mismo microorganismo en otra especie de langosta que anualmente devasta extensas zonas del distrito de Paraná, ha conseguido unos resultados sorprendentemente favorables.»

Los continuos trabajos de D'Hérelle sobre las bacterias le llevaron a descubrir los bacteriófagos en 1917.

Caballos despreciados

«El *Daily Mirror* londinense publica un mordaz editorial acerca de la insensatez que supone aplicar una tasa a los automóviles por usar las calles de las grandes ciudades: "En las calles de una gran ciudad, el caballo supone un peligro y una molestia. Mucho se oye hablar acerca de una tasa de calle para los coches de motor, pero dicha tasa debería imponerse a los caballos, no a los coches de motor. El caballo es antihigiénico, errático y ocupa demasiado espacio. ¡Graven el caballo, tal y como harían con los perros, y dejen en paz a los automóviles!"»



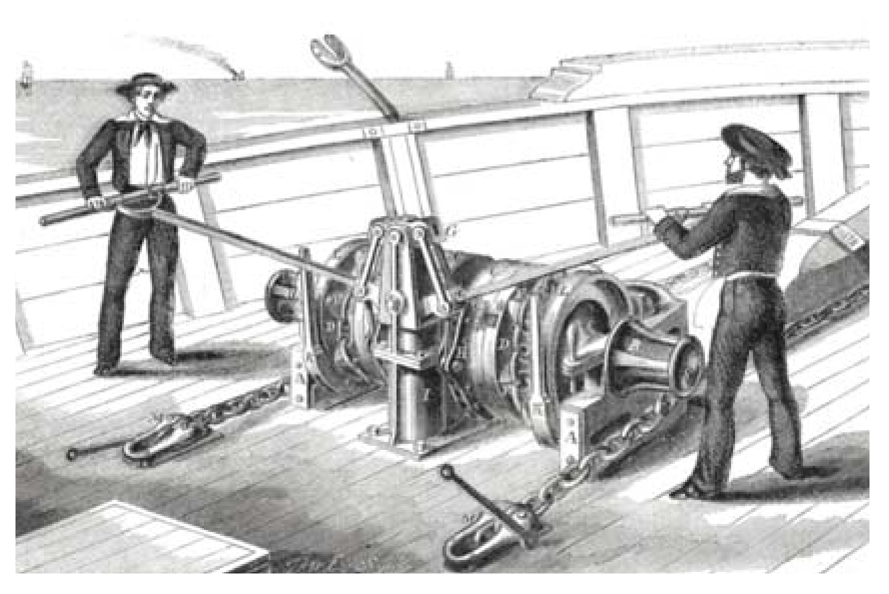
Octubre 1862

Levando anclas

«El dispositivo del que se sirven los buques para izar y soltar las anclas constituye un mecanismo muy importante para la seguridad y el funcionamiento de toda nave que se haga a la "mar bravía". En el grabado adjunto se representan nuevas y diferentes formas de tal dispositivo.»

Ayudas a los agricultores

«El informe del superintendente del censo de 1860 afirma: "Los mayores triunfos de la pericia mecánica aplicada a la agricultura quedan testimoniados por los implementos adaptados a la labranza, la recolección y la subsiguiente manipulación de las inmensas cosechas de grano del país, especialmente en las praderas del oeste. Sin las mejoras en los arados y otros aperos agrícolas, que se han visto multiplicadas en un grado increíble y que ahora, al parecer, están a punto de culminarse con el arado de vapor, es probable que las cosechas de trigo y maíz de esas fértiles llanuras jamás hubieran podido recogerse. La segadora, la cosechadora, la trilladora, la aventadora y la limpiadora que preparan el trigo para el mercado se han convertido hoy en absolutamente indispensables para todos los grandes cultivadores de grano."»



A vela o a vapor, la tripulación debe levar anclas antes de zarpar. Estos tornos, patentados en 1862, aceleraban la operación.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. VII, N.º 15; 11 DE OCTUBRE DE 1862



Cuestiones fundamentales para los próximos milenios

Computación más allá del límite cuántico

¿Llegaremos a ser más longevos e inteligentes?

Ambición tecnológica sin límites

Evolución hacia la superhumanidad

La mente entre el sueño y la vigilia

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Elices: *Control del daño*; Luis Bou: *¿Por qué cooperamos?*; Tomás Ortín: *La benevolencia de los agujeros negros*; Juan Pedro Adrados: *Rayos gamma en el interior de las nubes* e *Hidrógeno: ¿Una energía limpia para el futuro?*; Andrés Martínez: *Abejas atareadas* y *¿Qué especies sobrevivirán?*; Sara Arganda: *La mente alegre*; Yago Ascasibar: *Un siglo de rayos cósmicos*; José Manuel Vidal Donet: *El científico paciente* y *Senescencia celular*; Noelia de la Torre: *El lenguaje y la razón*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física* y *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Migraciones de medallas*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España